

ISSN 1813-5420

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

ЕНЕРГЕТИКА

економіка, технології, екологія



Науковий журнал

№3–2017

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

ЕНЕРГЕТИКА

економіка, технології, екологія

Науковий журнал

№ 3 (49) - 2017

Виходить 4 рази на рік
Заснований у березні 2000 року

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

Київ
КПІ ім. Ігоря Сікорського
2017

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*)

Технічний секретар Н.О. Кравчук.

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

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

Журнал внесено до Переліку фахових видань України, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук відповідно до рішення Атестаційної колегії МОН України від 13 грудня 2016 р., затверджене наказом МОН України № 1604 від 22 грудня 2016 р. Журнал включено до баз даних «Наукова періодика України» НБУВ, Google Scholar, Index Copernicus, WorldCat, BASE, OpenAIRE, PИHЦ, 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 № 10 від 6 листопада 2017 р.).

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

Відповідальний за випуск видання Н.О.Кравчук.

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

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

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

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

© КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017

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

POWER ENGINEERING

economics, technique, ecology

ENERHETYKA:
ekonomika, tekhnolohiyi, ekolohiya

The Scientific Journal

№ 3 (49) - 2017

Published 4 issues per year

Founded in March 2000

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

Kyiv

Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute

2017

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*).

Technical secretary N.O. Kravchuk

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

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

The Journal was registered by decision Attestation commission MES of Ukraine of December 13, 2016, approved by order of MES of Ukraine № 1604 of December 22, 2016 as an occupational edition. The Journal is included in databases «Scientific Periodicals of Ukraine», Google Scholar, Index Copernicus WorldCat, BASE, OpenAIRE, RSCI, Djerelo, URAN, Open Academic Journal Index (OAJI), Polska Bibliografia Naukowa, Research Bible, International Institute of Organized Research (I2OR), Academic Keys, General Impact Factor, Directory of Research Journals Indexing (DRJI), Scientific Indexing Services, Cosmos Impact Factor, Infobase Index, Real Time Impact Factor, electronic archive of research materials ELAKPI. Passed for printing under recommendation of Academic Council of National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" (protocol № 10 on November 6, 2017).

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

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

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

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

Attention! Reprint material in other publications only with the permission of editorial board of the journal **POWER ENGINEERING: Economics, Technique, Ecology**
© Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, 2017

ЗМІСТ

ЕНЕРГЕТИКА СТАЛОГО РОЗВИТКУ

С.П. Денисюк, В.А. Таргонський. Сталий розвиток енергетики України у світових вимірах 7

ЛІБЕРАЛІЗОВАНІ РИНКИ ЕНЕРГІЇ

Г.А. Іванов. Особливості моделювання лібералізованого роздрібного ринку електричної енергії України 32

І.В. Блінов, С.С. Танкевич. Підходи до об'єднання учасників конкурентного ринку електроенергії 39

В.А. Попов, П.О. Замковий, Д.С. Поплавець, Л.В. Охота. Прогнозування цін на електричну енергію з використанням нечітких часових рядів 45

ЕНЕРГЕТИЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ТА ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

М.Я. Острроверхов, М.О. Реуцький, Д.Я. Трінчук. Дослідження ефективності перетворення енергії в приводі електроскутера в залежності від системи живлення та навантаження 51

В.П. Розен, Л.В. Давиденко, Н.В. Давиденко. Процедура побудови базового рівня електроспоживання об'єктів водопостачання з урахуванням впливу зовнішніх чинників 57

В.В. Макаренко, В.М. Співак. Аналіз ефективності використання синхронних випрямлячів в імпульсних джерелах живлення 62

В.І. Василенко. Оцінка потенціалу енергозбереження в бюджетній сфері на основі рангового аналізу 70

SMART GRID СИСТЕМИ ТА ТЕХНОЛОГІЇ

О.М. Мороз, М.М. Черемісін, О.А. Савченко, С.А. Попадченко, С.В. Дюбко. Використання технологій Smart Grid для підвищення ефективності електропостачання споживачів 82

В.Я. Жуйков, К.С. Осипенко. Принцип преємптивного керування у Smart Grid 87

МОНІТОРИНГ, ДІАГНОСТИКА ТА КЕРУВАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ ТА ОБЛАДНАННЯМ

М.Я. Острроверхов, В.М. Пижов. Ефективне керування синхронною реактивною машиною з незалежним збудженням 92

О.В. Чермалих, А.В. Босак, О.В. Данілін. Оптимізація динамічних режимів шахтоної підйомної установки 97

В.С. Михайленко, А.Н. Харабет. Інтелектуалізація оцінки надійності паросилової установки великого судна 103

О.М. Сінчук, В.А. Кольсун, Д.В. Риженков, В.М. Макодзьоб. Дволанковий перетворювач частоти, як джерело гармонік Smart-мереж 108

ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

Є.Є. Чайковська. Інтелектуальні системи підтримки функціонування енергетичних систем на рівні прийняття рішень 114

І.В. Гладь, Я.В. Бацала. Вплив сонячних електростанцій на низьковольтні розподільні мережі 119

А.В. Волошко, Д.В. Филянин. Применение алгоритмов быстрого преобразования Фурье и дискретного преобразования Фурье для обнаружения, локализации и оценки искажения синусоидальности кривых тока и напряжения 124

СИСТЕМНІ ЕКОЛОГО-ЕНЕРГЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

О.А. Дорож, В.І. Ковальчук. Системи радіаційного моніторингу АЕС 132

ТЕХНОЛОГІЇ ТА ОБЛАДНАННЯ В ЕНЕРГЕТИЦІ

І.А. Чижевська. Моделювання найближчої перспективи: новітні гравці, функції та технології в енергетиці країни 137

В.В. Височин. Інформаційні аспекти впровадження систем контролю та планування енергоспоживання на котельних ЦСТ 144

Вимоги до оформлення статей 149

CONTENTS

SUSTAINABLE ENERGY

- S. Denysiuk, V. Tarhonskyi.** Sustainable development of Ukraine`s energy in the world mesures..... 7

LIBERALIZED ENERGY MARKET

- H. Ivanov.** Determination of requirements for modeling of the liberalized retail electricity market of Ukraine 32
- I. Blinov, S. Tankevych.** Approaches to association of competitive electricity market participants..... 39
- V. Popov, P. Zamkovyi, D. Poplavets, L. Okhota.** Fuzzy time series for electricity price forecasting..... 45

ENERGY EFFICIENCY AND ENERGY SAVING

- M. Ostroverkhov, M. Reutskyi, D. Trinchuk.** Research of the electric scooter drive energy transformation efficiency depending on power supply and load..... 51
- V. Rozen, L. Davydenko, N. Davydenko.** Energy baseline construction procedure of water supply facilities with taking into consideration the external factors effect..... 57
- V. Makarenko, V. Spivak.** Analysis of the effectiveness of the use of synchronous rectifiers in switching power supplies 62
- V. Vasilenko.** Estimation of potential of energy saving in the budget sphere based on the range analysis ... 70

SMART GRID SYSTEMS AND TECHNOLOGIES

- O. Moroz, N. Cheremisin, O. Savchenko, S. Popadchenko, S. Diubko.** Using Smart Grid`s technologies for increasing efficiency of consumers` electric supply 82
- V. Zhuikov, K. Osypenko.** Principle of preemptive control in smart grid 87

MONITORING, DIAGNOSTIC AND MANAGEMENT OF POWER PROCESSES AND EQUIPMENT

- M. Ostroverkhov, V. Pyzhov.** Effective control of field regulated reluctance machine 92
- A. Chermalykh, A. Bosak, A. Danilin.** Optimization of dynamic modes of mine hoisting plant 97
- V. Mikhaylenko, A. Kharabet.** Intellectuaalomandi assessing the reliability of steam power plant of a large ship..... 103
- O. Sinchuk, V. Kolsun, D. Ryzhenkov, V. Makojob.** Indirect power converter as a source of harmonics in a smart grid 108

ENERGY SYSTEMS AND COMPLEXES

- E. Chaikovskaya.** Intellectual systems for support of energy systems functioning at level of decision-making 114
- I. Glad, Y. Batsala.** Influence of solar power plants on low-voltage distribution networks..... 119
- A. Voloshko, D. Filyanin.** Detection and localizatin of power quality disturbanses based on fast Fourier transform and discrete Fourier transform..... 124

ENVIRONMENTAL AND ENERGY SYSTEM RESEARCH

- O. Dorog, V. Kovaltchuk.** Systems of radiation monitoring..... 132

ENERGY TECHNOLOGIES AND EQUIPMENT

- I. Chyzhevskaya.** Short-term modeling: the newest players, functions and technologies in ukrainian energy sector..... 137
- V. Wysochin.** Factors of a choice of heating loading of a solar plant system with the soil accumulator of heat 144

ЕНЕРГЕТИКА СТАЛОГО РОЗВИТКУ SUSTAINABLE ENERGY

УДК 621.3

С.П. Денисюк, д-р техн. наук, проф. ORCID 0000-0002-6299-368
В.А. Таргонський, магістрант ORCID 0000-0003-3801-8284

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

СТАЛИЙ РОЗВИТОК ЕНЕРГЕТИКИ УКРАЇНИ У СВІТОВИХ ВИМІРАХ

У статті розглянуто особливості сталого розвитку світової енергетики, дана характеристика ініціативи «Стала енергетика для всіх» (Sustainable Energy for All, SEforAll). Наведено оцінку впливу розвитку енергетики на сталий розвиток економіки в цілому та на кліматичні зміни в рамках положень Паризької кліматичної угоди. Для оцінки напрямків розвитку енергетики України в XXI ст. представлено європейські орієнтири. Детально проаналізовано стан виконання вимог сталого розвитку в українському паливно-енергетичному секторі у відповідності до Цілі сталого розвитку № 7 та основних завдань національних директивних документів.

Для аналізу перспектив розвитку національного паливно-енергетичного сектору проаналізовано показники енергетичної трилеми (енергетична безпека, енергетична рівність, екологічна стійкість), запропонованої СЕР, для України та окремих країн світу. Для комплексної характеристики окремих секторів паливно-енергетичного комплексу України здійснено співставлення показників України та окремих країн як за даними Всесвітнього банку даних Enerdata Yearbook, зокрема, динаміки зміни енергоємності, споживання та виробництво енергії у 1990–2016 роках, а також за даними World Development Indicators у 2016 р. Охарактеризовано стан України за результатами 2016 р. за даними World Economic Forum згідно Global Energy Architecture Performance Index за такими показниками як економічне зростання і розвиток, екологічна стійкість, енергетичний доступ і безпека.

Ключові слова: сталий розвиток, стала енергетика для всіх, енергетична трилема, енергоємність, споживання та виробництво енергії, Enerdata Yearbook, Global Energy Architecture Performance Index.

Вступ

Енергія є основою забезпечення промислового виробництва, надання послуг в транспортній сфері, функціонування житлово-комунального господарства, створення сприятливих умов для життєдіяльності населення, а енергетика – галузь, що в значній мірі визначає рівень соціально-економічного розвитку країни [5, 9, 13, 15–22]. Важливим пріоритетом розвитку енергетики на довгострокову перспективу повинна стати мінімізація ризиків: економічних, соціальних, екологічних, що має додати стійкість розвитку енергетики і всієї економіки нашої країни. У світі екологічний фактор стає все більш важливим пріоритетом для формування нової економіки, модернізації, технологічного оновлення, що і визначає необхідність переходу до сталого розвитку та «зеленої» енергетики, структурно-технологічної модернізації та трансформації українського енергетичного сектора [2, 8, 13].

У значній мірі розвиток як світової енергетики, так і енергетики України, у першій половині XXI ст. буде визначати Паризька кліматична угода ООН (прийнята в Парижі консенсусом 12 грудня 2015 р. та підписана 22 квітня 2016 р.). Метою Паризької кліматичної угоди (відповідно до статті 2) є «активізувати здійснення» Рамкової конвенції ООН зі зміни клімату, зокрема, утримати зростання глобальної середньої температури «набагато нижче» 2 °C і «докласти зусиль» для обмеження зростання температури величиною 1,5 °C [1, 4, 5, 7, 9]. Важливо оцінити розвиток енергетики України згідно вимог сталого розвитку. Використання різних світових оцінок надасть можливість об'єктивно проаналізувати теперішню ситуацію і розглянути подальші перспективи розвитку енергетики України згідно вимог сталого розвитку.

Сталий розвиток енергетики: сутність та методичні підходи до оцінки

Термін «сталий розвиток» (sustainable development) набув широкого поширення у 1987 р. після того, як Міжнародна комісія з навколишнього середовища і розвитку ООН (комісія Гро Гарлем Брундтланд) опублікувала доповідь «Наше спільне майбутнє». У цій доповіді сталий розвиток визначається наступним чином: «Людство здатне надати розвитку сталий і довготривалий характер з тим, щоб він відповідав потребам нині живих людей, не позбавляючи майбутні покоління можливості задовольняти свої потреби. Сталий і довготривалий розвиток являє собою не незмінний стан гармонії, а скоріше процес змін, в якому масштаби експлуатації ресурсів, напрямки капіталовкладень, орієнтація технічного розвитку та

інвестиційні зміни узгоджуються з нинішніми і майбутніми потребами» [1, 3, 7, 13]. Сталий розвиток енергетики є однією з цілей сталого розвитку економіки в цілому. Сталий розвиток енергетики прийнято характеризувати в розрізі економічної, екологічної та соціальної компоненти. Його доцільно розглядати на 3 рівнях: 1) на рівні держави; 2) на рівні галузей енергетики; 3) на рівні підприємств енергетики [4, 5, 9, 13].

Сталий розвиток енергетики держави являє собою здатну до саморегулювання систему забезпечення енергетичної безпеки з урахуванням оптимізації територіальної структури виробництва і споживання ПЕР при підвищенні самостійності регіонів у вирішенні питань енергозабезпечення, включаючи контроль за раціональним використанням енергоресурсів, енергозбереження, виробництвом теплової та електричної енергії, а також пошук нових способів автономного задоволення потреб промисловості та населення регіон в енергії. Центральним у цьому розумінні сталого розвитку енергетики держави є забезпечення енергетичної безпеки країни.

Доцільним у подальшому також є розгляд сталого розвитку галузей енергетики як процесу технологічного та економічного їх розвитку в невизначених умовах, спрямованого на надійне і безперебійне енергопостачання споживачів при раціональному використанні ресурсів і мінімальному впливі на навколишнє середовище з метою підвищення ефективності функціонування регіону. У свою чергу, сталий розвиток підприємств енергетики – це процес технологічного та економічного їх розвитку в невизначених умовах, спрямований на досягнення їх стратегічних цілей при підвищенні задоволеності замовників, виконання зобов'язань перед різними контрагентами та мінімальному впливі на довкілля з метою підвищення ефективності функціонування галузей енергетики та регіональної економіки.

У 2000 році Декларацією Тисячоліття ООН (затвердженою резолюцією № 55/2 Генеральної Асамблеї від 8 вересня 2000 року) було визначено орієнтири глобального розвитку до 2015 року – Цілі Розвитку Тисячоліття. Ріо-де-Жанейрська Декларація по навколишньому середовищу і розвитку задекларувала, що «Стала енергетика – енергетика, вироблена і використана на шляху, який підтримує людський розвиток в довгостроковій перспективі у всіх його економічних, соціальних та екологічних аспектах» (прийнята Конференцією ООН по навколишньому середовищу і розвитку, Ріо-де-Жанейро (Бразилія), 3–14 червня 1992 року).

З 26 серпня по 4 вересня 2002 року в Йоганнесбурзі (ПАР) відбулася Всесвітня зустріч на вищому рівні зі сталого розвитку, яка оцінила досягнення, а також зміни та появу нових проблем після зустрічі на вищому рівні «Планета Земля» у 1992 році. Цей саміт трансформував мету, обіцянки і зобов'язання «Agenda 21» в конкретні та практичні дії. На саміті «Планета Земля» визначено, що стратегія розвитку сталої енергетики – розробка політики, що заохочує розвиток енергетики і технологій, заснованих на відновлюваних джерелах енергії (ВДЕ) та більш чистих видах викопного палива; розробка програм, що підтримують енергоефективність та використання відновлюваної енергії [4, 9, 12, 23].

Глава ООН Пан Гі Мун (Ban Ki Moon) у вересні 2011 році виступив з ініціативою «Стала енергетика для всіх» (Sustainable Energy for All, SEforAll). «Стала енергетика для всіх» (далі – SEforALL) – ініціатива Генерального Секретаря ООН та Президента Світового Банку Джим Юн Кім (Jim Yong Kim). Нову глобальну ініціативу розпочала здійснювати координаційна група у складі 20 установ системи ООН «ООН-енергетика», очолювана Генеральним секретарем ООН Пан Гі Муном. Ініціатива SEforALL народилася з усвідомлення необхідності змін, оскільки в Декларації тисячоліття була відсутня мета в області розвитку енергетики, виникла певна незадоволеність щодо відсутності розуміння важливості питань енергетики, особливо екологічно чистої енергії. Генеральним секретарем ООН Пан Гі Мун проголошено «Стала енергетика для всіх необхідна і досяжна. Ми повинні побудувати нове енергетичне майбутнє, засноване на пануванні технологій і інновацій, поставлених на службу людям і планеті. Стала енергетика для всіх є благом для економіки та довкілля, вона також сприяє більшій справедливості в глобальному масштабі. Це шлях, що веде в майбутнє» [1].

Глобальна ініціатива SEforALL спрямована на досягнення до 2030 року трьох основних цілей [1, 5, 9, 23]: забезпечення повсюдного доступу до сучасних енергетичних послуг; зниження світового споживання електроенергії на 40%; збільшення частки ВДЕ в світі до 30%. Ініціатива SEforALL передбачає революційні та еволюційні заходи, спрямовані на реформування системи використання джерел енергії. У рамках цієї ініціативи експерти визначили як щорічно мобілізувати 120 млрд. дол. для розвитку сталої енергетики. Експерти Світового банку вважають, що для реалізації ініціативи SEforALL необхідно в три рази збільшити інвестиції в сферу енергетики (до 1,25 трлн. дол. США).

У своїй резолюції А 65/151 від 4 грудня 2011 р. Генеральна Асамблея ООН на знак визнання важливості енергетики для сталого розвитку постановила проголосити 2012 рік «Міжнародним роком сталої енергетики для всіх». Асамблея рекомендувала всім державам-членам ООН скористатися проведенням Року для підвищення рівня обізнаності про важливість вирішення питань, пов'язаних із забезпеченням сучасного енергопостачання, доступом до недорогих енергоресурсів, енергоефективністю та екологічністю джерел енергії.

У січні 2012 року Генеральний секретар ООН Пан Гі Мун представив Генеральній Асамблеї

п'ятирічну програму дій, що має назву «Майбутнє, якого ми прагнемо», яка являє собою план, покликаний сприяти побудові більш безпечного, більш надійного, більш стійкого і більш справедливого майбутнього. Пан Гі Мун визначив «сталу енергетику для всіх в якості одного з головних пріоритетів, оскільки вона є центральним елементом всіх аспектів сталого розвитку». У цьому ж місяці Група високого рівня з глобального сталого розвитку під керівництвом Чарльза Холлідея та Кандех Юмкелла, у своїй доповіді під назвою «Життєздатна планета життєздатних людей: майбутнє, яке ми вибираємо» схвалила ініціативу SEforALL і заявила, що її необхідно негайно втілити в життя.

Розроблена програма «Стала енергетика для всіх: Глобальна програма дій» затверджена резолюцією ООН А/67/175 від 31 липня 2012 р. У Глобальній програмі дій визначені 11 сфер діяльності, спрямованих на досягнення трьох зазначених цілей SEforALL. Сфери діяльності охоплюють сім «секторальних» областей: а) сучасне кухонне обладнання і види палива; б) раціональні варіанти розподілу електроенергії; с) інфраструктура та ефективність електроенергетичних систем; д) великомасштабні відновлювані джерела енергії; е) промислові та сільськогосподарські процеси; ф) транспорт; г) будівлі та побутові прилади. Є також чотири «допоміжні» області діяльності: а) планування та стратегії у сфері енергетики; б) бізнес-модель і технологічні інновації; с) фінансові ресурси і регулювання ризиків; д) зміцнення потенціалу та обмін знаннями.

Як глобальна платформа, SEforALL надала змогу лідерам здійснювати партнерські відносини та розгорнути фінансування для досягнення загального доступу до стійкої енергії як внесок у створення більш чистого, справедливого і процвітаючого світу для всіх. Розроблена серія «теплових карт», які показують, де відбувається прогрес, щоб була можливість відтворити успіх інших і допомогти лідерам уряду, бізнесу та громадянського суспільства зробити правильний вибір.

У 2012 році на Конференції ООН зі сталого розвитку Ріо+20 «Майбутнє, якого ми прагнемо» (відомої як Саміт «Ріо + 20», що відбувся 20–22 червня 2012 році в Ріо-де-Жанейро (Бразилія)) питання майбутнього розвитку було включене у підсумковий документ у формі запиту до Генеральної Асамблеї ООН щодо створення міжурядової Робочої групи для внесення пропозицій щодо нових цілей – Цілей сталого розвитку (ЦСР). У підсумковому документі визначено, що формулювання ЦСР має бути узгоджено з Цілями Розвитку Тисячоліття та з процесом формування «Порядку денного в галузі розвитку після 2015 року». На Конференції ООН зі сталого розвитку держави домовилися створити відкриту робочу групу для розробки комплексу Цілей сталого розвитку.

Підсумковий документ під назвою «Майбутнє, якого ми прагнемо» схвалено цією конференцією та прикладено до Резолюції 66/288 Генеральної Асамблеї ООН від 11 вересня 2012 р.). Цей документ визначає важливу роль енергії в процесі розвитку, оскільки доступ до сталих сучасних енергетичних послуг сприяє викориненню бідності, рятує життя, покращує здоров'я і допомагає забезпечити задоволення основних людських потреб [1]. У резолюції № 66/288 «Майбутнє, якого ми прагнемо» зазначено, що підвищення енергоефективності, збільшення частки ВДЕ та перехід на більш екологічно чисті та енергоефективні технології мають важливе значення для сталого розвитку, в тому числі для боротьби зі зміною клімату. Визнано необхідність вжиття заходів щодо забезпечення енергоефективності в ході міського планування, при експлуатації будівель і транспорту, а також при виробництві товарів і послуг та розробці нової продукції. Зазначено важливість пропаганди стимулів для підвищення енергоефективності та диверсифікації джерел енергії, а також усунення перешкод у цій сфері, у тому числі шляхом надання сприяння відповідним дослідженням і розробкам.

Резолюція № 67/215 «Сприяння розширенню використання нових та відновлюваних джерел енергії», прийнята Генеральною Асамблеєю 21 грудня 2012 року, постановляє оголосити 2014–2024 роки «Десятиліттям сталої енергетики для всіх» ООН для сприяння реалізації цієї концепції стосовно всіх джерел енергії, беручи до уваги положення додатка до резолюції 1980/67 Економічної і Соціальної Ради від 25 липня 1980 року та підкресливши важливість сучасних послуг у сфері екологічно сталого енергопостачання для ліквідації бідності та розвитку в цілому.

У жовтні 2013 року засновано Копенгагенський центр з питань енергоефективності (The Copenhagen Centre on Energy Efficiency – C2E2). C2E2 слугує центром енергоефективності ініціативи генерального секретаря ООН з питань сталого енергозабезпечення для всіх (the Energy Efficiency Hub of the UN Secretary General's Sustainable Energy for All) та відіграє провідну роль у просуванні однієї з цілей – подвоїти рівень підвищення енергоефективності до 2030 року. C2E2 сконцентрував зусилля на роботі в регіонах із залученням місцевих партнерів до проведення аналізу та здійснення огляду застосовуваних заходів політики щодо підвищення енергоефективності, відповідних пріоритетів і можливостей в ключових країнах Африки, Азії, Східної Європи, Кавказу, Середньої Азії та Латинської Америки.

У 2014 році на сесії Генеральної Асамблеї ООН в узагальненій доповіді «Дорога до гідного життя до 2030 року: викоринення бідності, перетворення умов життя всіх людей та захист планети» представлено основні положення щодо цілей розвитку на наступний програмний період. У липні 2014 року робоча група Генеральної Асамблеї ООН по цілям сталого розвитку схвалила документ, що містить ряд екологічних, економічних і соціальних завдань, спрямованих на досягнення сталого розвитку.

У вересні 2015 року в рамках 70-ї сесії Генеральної Асамблеї ООН у Нью-Йорку відбувся Саміт ООН з прийняття Порядку денного розвитку після 2015 року, на якому було затверджено нові орієнтири розвитку. Підсумковий документ «Перетворення нашого світу: порядок денний у сфері сталого розвитку до 2030 року» було затверджено 25 вересня 2015 року на відкритті цього Саміту ООН.

25 вересня 2015 року 193 держави-члени ООН на Саміті зі сталого розвитку в Нью-Йорку одноставно прийняли нову глобальну програму сталого розвитку (початок реалізації з 1 січня 2017 р.). Резолюція Генеральної Асамблеї ООН «Перетворення нашого світу: Порядок денний розвитку у галузі сталого розвитку на період до 2030 року» визначає 17 цілей сталого розвитку (ЦСР) з 169 цільовими показниками, на противагу попереднім восьми цілям розвитку тисячоліття, які передбачали досягнення 21 цільового показника [7, 8]. Це стало початком роботи з формування нових цілей розвитку на наступні п'ятнадцять років – до 2030 року. ЦСР відображають масштаб та спрямування нового порядку денного, а також враховують незавершені питання Цілей розвитку тисячоліття. ЦСР є всеохоплюючими та неподільними, вони враховують три аспекти сталого розвитку: економічний, соціальний та екологічний. При цьому ЦСР слугують орієнтирами для встановлення цілей на національному рівні та моніторинговим інструментом для вимірювання суспільного прогресу у 193 країнах світу.

З точки зору енергетичного сектора для нас важливо проаналізувати ЦСР7 – **Ціль 7. Забезпечення доступу до недорогих, надійних, стійких і сучасних джерел енергії для всіх**. Ціль 7 має наступні підцілі:

7.1. До 2030 року забезпечити загальний доступ до недорогого, надійного і сучасного енергопостачання;

7.2. До 2030 року значно збільшити частку енергії з відновлюваних джерел у світовому енергетичному балансі;

7.3. До 2030 року подвоїти глобальний показник підвищення енергоефективності;

7.a. До 2030 року активізувати міжнародне співробітництво з метою полегшення доступу до досліджень і технологій в галузі екологічно чистої енергетики, включаючи відновлювану енергетику, підвищення енергоефективності та передові й більш чисті технології використання викопного палива, та заохочувати інвестиції в енергетичну інфраструктуру і технології екологічно чистої енергетики;

7.b. До 2030 року розширити інфраструктуру і модернізувати технології для сучасного та сталого енергопостачання всього загалу у країнах, що розвиваються, зокрема у найменш розвинених країнах, малих острівних державах, що розвиваються, і країнах, які не мають виходу до моря, з урахуванням їх відповідних програм підтримки.

Власне ЦСР7 прийнята на тлі серйозного дисбалансу в розвитку світової енергетики: понад мільярд людей на планеті не забезпечені електроенергією в достатньому обсязі, а потенціал підвищення ефективності енергоспоживання будівель, транспортної системи і виробничих процесів залишається в значній мірі неосвоєних. Експерти визначили, що коли ЦСР7 не буде досягнута, буде вкрай складно забезпечити доступ до якісної охорони здоров'я і освіти, гендерна рівність, нові робочі місця, економічне зростання, сталий споживання або ефективну боротьбу зі змінами клімату, які ставлять під загрозу досягнення всіх цілей. Наслідком уваги до даної проблематики стала ініціатива SEforALL та Десятиліття стійкої енергетики для всіх Організації Об'єднаних Націй (2014–2024 роки).

Ініціатива SEforALL є потужним інструментом для виконання обіцянок щодо Цілей сталого розвитку та Паризької кліматичної угоди. «Ефективна чиста енергія – це золота нитка, яка пов'язує економічне зростання, збільшення соціальної справедливості та здорового навколишнього середовища» зазначив Пан Гі Мун [1]. Енергія є основою для соціального та економічного благополуччя, однак на сьогодні 1,1 млрд. людей не має доступу до електрики, а 2,9 млрд. мають готувати з забруднюючих, неефективних палив, таких як дрова. Без швидкого прогресу в реалізації ЦСР7, який вимагає «доступної, надійної, стабільної та сучасної енергії для всіх», до 2030 року неможливо буде забезпечити досягнення інших цілей сталого розвитку. Одночасно виробництво та використання енергії є домінуючою причиною зміни клімату. Власне термін «глобальне потепління» був запропонований американським геологом і кліматологом Уоллесом Брокером ще в 1975 році у статті «Зміна клімату: чи ми на порозі різкого глобального потепління?» (журнал Science). У той час ще було не ясно, наскільки великий масштаб цього явища. У 70-ті роки ХХ ст. цим питанням займалися лише деякі вчені. Однак через чотири десятиліття стало очевидно, що глобальне потепління перетворилося на справжню екологічну проблему, яка викликає як соціальні, так і економічні та політичні наслідки.

Вимоги Паризької кліматичної угоди щодо скорочення викидів парникових газів

У грудні 2015 року на 21-й конференції сторін рамкової конвенції ООН зі зміни клімату була прийнята нова міжнародна кліматична угода – Паризький договір (на зміну Кіотському протоколу). Угода набере чинності 1 січня 2021 року. Угода є результатом майже десятирічних переговорів в рамках Рамкової конвенції ООН про зміну клімату. Формальне розпорядження розробити протокол, інші правові документи та представити документ, що має юридичну силу і який можна застосовувати до всіх учасників, було прийнято в м. Дурбан в 2011 р. В рамках Дурбанської робочої групи сторони вели переговори по двох взаємозалежних напрямках: Напрямок 1 було пов'язано з переговорами щодо Угоди 2015 року; Напрямок

2 було націлене на підтримку намірів країн учасників по скороченню викидів шкідливих речовин, поки Угода не набере, як очікується, в силу у 2022 р.

Паризька кліматична угода потенційно накладає на Україну нові зобов'язання із скорочення викидів парникових газів (ПГ). Це безпосередньо впливає на розвиток енергетичного сектора країни як найбільшого джерела викидів парникових газів. Паризька кліматична угода, серед іншого, встановлює ціль щодо утримання глобальної температури на Землі в межах 2°C до 2100 року. Однак відповідно до очікуваних національно-визначених внесків (ОНВВ) країн-підписантів викиди парникових газів цих країн спричинять зростання глобальної температури на рівні 3,5 °C до 2100 року. На переговорах у Парижі українська делегація озвучила ціль із скорочення викидів на 40 % до 2030 року відносно рівня викидів ПГ 1990 року.

Згідно з новою глобальною ціллю Паризької кліматичної угоди (2 °C), у разі припущення пропорційності викидів ПГ до зміни глобальної температури, власне ціль мусить бути скоригована з 40% до 70% у 2050 році до 1990 року, що може відповідати сценарію утримання глобальної температури в межах 2 °C. Ймовірно, що на наступних кліматичних переговорах Україні запропонують взяти на себе саме такі зобов'язання. Співставлення викидів парникових газів у 1990–2012 роках та майбутні цілі для України (т CO₂-екв): 1990 р. – 870,40; 2000 р. – 361,70; 2005 р. – 378,50; 2010 р. – 345,20; 2012 р. – 371,0; 2020 р. – 696,0 (ціль 1 – скорочення 25 %); 2030 р. – 522,0 (ціль 2 – скорочення 40 %); 2050 р. – 261,0 (ціль 3 – скорочення 70 %).

Визначено, що енергоефективність та ВДЕ відіграватимуть найважливішу роль у запобіганні підвищенню глобальної температури більш ніж на 2 °C і скороченню викидів CO₂ у період до 2050 року.

Наступна кліматична конференція відбулася з 7 по 18 листопада 2016 р. у Марракеші. Близько 15 тис. представників зі 196 країн світу зібрались 7 листопада 2016 р. у марокканському місті Марракеші для обговорення дорожньої карти втілення Паризької кліматичної угоди. «Ми закликаємо до найвищої політичної відданості боротися зі зміною клімату, що є питанням нагального пріоритету», – наголошується у «Марракеській декларації щодо дій» (ухвалено 17 листопада 2016 р.)

6 – 17 листопада 2017 року в Бонні пройшла Всесвітня конференція ООН з питань зміни клімату (COP23), в якій взяли участь глави держав і представники урядів близько 200 держав (близько 25 тис. представників). Основне питання конференції – розробка конкретних заходів щодо здійснення Паризької кліматичної угоди. 2017 рік може стати одним із трьох найспекотніших з моменту початку спостережень у XIX столітті. Про це на конференції заявив генеральний секретар Всесвітньої метеорологічної організації ООН (ВМО ООН) Петтері Таалас. За попередніми даними ВМО ООН, через потужний феномен «Ель-Ніньйо» 2016 рік, вочевидь, залишиться найтеплішим роком в історії досліджень, а 2017 р. та 2015 р. посядуть друге і (або) третє місце. Період з 2013 по 2017 рік стане найтеплішим п'ятиріччям від початку спостережень, йдеться в попередньому звіті ВМО ООН про стан клімату, оприлюдненому 6 листопада з нагоди початку конференції в Бонні.

В рамках заходів конференції Генеральний секретар ООН Антоніу Гутерріш (António Guterres) заявив, що у людства є всього 5 років на те, щоб спробувати утримати підвищення глобальної температури в межах 1,5 °C; для цього вже до 2020 року потрібно скоротити емісії парникових газів хоча б на чверть.

Головним результатом конференції у Бонні став проект документів щодо виконання Паризької кліматичної угоди. Затвердити цей проект планують на наступній кліматичній конференції, яка відбудеться у 2018 році. У проекті правил щодо виконання Паризької кліматичної угоди йдеться головню про те, яким чином 195 держав-учасниць мають вимірювати обсяг викидів CO₂ в атмосферу. Усі держави-підписанти повинні застосовувати однакові методи вимірювання. 16 листопада 2017 р. 18 держав, а також кілька американських штатів і підприємств (усього 25 учасників) оголосили про створення міжнародного альянсу за відмову від вугільної енергетики.

Американські державні відомства 3 листопада 2017 р. опублікували звіт (обсягом 477 стр.), який вказує на вину людини у глобальних змінах клімату [12]. У звіті зазначено, що «дуже ймовірно, що людський вплив був домінуючою причиною потепління, яке спостерігається з середини XX ст. Для потепління впродовж останнього століття відсутні переконливі альтернативні пояснення, які б ґрунтувалися на доказах, зібраних під час спостережень». Згідно зі звітом рівень моря до 2100 року може піднятися на 2,4 м. Звіт визначає складові шкоди, вже завданої США через глобальне потепління. У звіті також згадуються інші негативні впливи людства на стан довкілля: окислення океанів та забруднення повітря, яке однак дещо скоротилося у 2014 та 2015 роках. Документ було підготовлено за участі сотень учених та державних службовців. Американська Національна академія наук переглянула звіт перед тим, як його було передано 13-м відомствам, які й оприлюднили його. Білий дім не став блокувати публікацію або змінювати текст. Як зазначено в жовтневому звіті за 2017 рік Потсдамського інституту вивчення клімату (PIK) «дестабілізація клімату може привести до дестабілізації суспільства».

Для реалізації глобальної, багатосторонньої платформи SEforALL, яка буде стимулювати дії для ЦСР 7 з врахуванням Паризької кліматичної угоди, розроблено нову п'ятирічну стратегію. Стратегічні рамки для планів на 2016–2021 років під назвою «Ідемо далі, швидше» («Going Further, Faster») було

схвалено 15 червня 2016 року в Брюсселі Консультативною радою зі сталої енергетики, співголовами якої є Генеральний секретар ООН Пан Гі Мун і президент групи Світового банку Джим Юн Кім. Запропоновано нову систему взаємовідносин, яка сприятиме новому періоду дій та розробці політики для SEforALL, зокрема, вирішенню проблеми подвійного енергетичного виклику: як ми забезпечуємо сучасний, надійний доступ до енергії для всіх, не сприяючи кліматичним змінам?

У лютому 2017 р. Світовий банк опублікував перший узагальнюючий звіт за результатами дослідження RISE – Regulatory Indicators for Sustainable Energy («Показники регулювання сталої енергетики») [16]. У документі порівнюються політики країн в трьох областях: доступ громадян до енергії, енергоефективність і держпідтримка відновлюваної енергетики. Метою звіту є допомога урядам в оцінці того, чи є у них необхідна політична і нормативна база для досягнення прогресу в області сталої енергетики, а також у визначенні напрямків, більш широкого залучення приватних інвестицій.

У дослідження були включені 111 країн, які сукупно становлять 96 % світового населення і 91 % енергоспоживання. Для оцінки результативності держполітики кожної країн використовувалися 27 індикаторів і 80 підіндикаторів. Абсолютними лідерами сукупно за всіма трьома областям виявилися Данія, США і Канада. Загальний бал України – 67 балів (з 100), вона в рейтингу займає 45 місце – останнє в «середній» зоні. В області енергоефективності лідирують США – 88 балів, далі йдуть Данія та Румунія. Україна тут отримала 37 балів і опинилася на межі зони «нижче середнього». Серед причин такої низької оцінки експерти назвали брак інформації, що надається споживачам; незначимість стимулів до енергозбереження від структури тарифів; мала кількість стимулів до економії у великих підприємств і в комунальній сфері, практично повна відсутність подібних стимулів в держсекторі, недостатня кількість стандартів для мінімального споживання енергії. В області держпідтримки відновлюваної енергетики лідер Данія (94), за нею йдуть Нідерланди та Німеччина. Україна отримала 64 бали, розташувалась у середині зони «нижче середнього». Головні проблеми в цій сфері пов'язані з недостатніми стимулюванням і нормативною підтримкою впровадження ВДЕ, а також з труднощами підключення джерел до мереж. В області доступу до енергії України має максимальні 100 балів (таку ж оцінку отримали ще багато країн).

Європейські орієнтири розвитку енергетики згідно принципів сталого розвитку

Конкретні цілі зі сталого розвитку були визначені в Європейській стратегії сталого розвитку, прийнятої країнами ЄС в Гетеборзі в 2001 р. У липні 2006 р. країнами ЄС була затверджена оновлена стратегія сталого розвитку, яка розширила тематику попередньої стратегії. У ній були виділені сім головних цілей сталого розвитку, першою з яких є зміна клімату і впровадження чистих джерел енергії (скорочення викидів парників газів, енергозбереження, зростання частки ВДЕ).

У 1992 році започатковано формування єдиної енергетичної інфраструктури Євросоюзу (Treaty on European Union, Maastricht), а у 1995 році розроблена єдина для Євросоюзу енергетична політика (White paper «An energy policy for the European Union», Brussels) [23]. У 2006 році була сформульована Європейська стратегія сталого, конкурентоспроможного і безпечного енергопостачання [11], що дозволило у 2011 році прийняти «Енергетичну дорожню карту – 2050», що передбачає декарбонізація і безпеку енергосистеми (Energy Roadmap 2050, Brussels) [15].

На саміті 23–24 жовтня 2014 р. Європейська Рада схвалила основні напрямки політики в області клімату та енергетики до 2030 року. В основу рішення Європейської Ради покладені повідомлення Комісії від 22 січня 2014 «Основа політики в області клімату та енергетики з 2020 до 2030 року» та повідомлення Комісії від 23 липня 2014 «Енергоефективність та її внесок в енергетичну безпеку та основи політики в області клімату та енергетики до 2030 року». У висновку Європейської ради 23–24 жовтня 2014 р. затверджені базові елементи кліматичної та енергетичної політики ЄС: 1) узгоджена обов'язкова на рівні ЄС мета – скоротити викиди парникових газів до 2030 року на 40 % порівняно з рівнем 1990 року; 2) узгоджена обов'язкова на рівні ЄС мета: довести до 2030 року до 27 % частку відновлюваної енергії в енергобалансі ЄС; 3) узгоджена індикативна мета на рівні ЄС: до 2030 року підвищити на 27 % рівень енергоефективності в порівнянні зі сценарієм «business as usual». У цьому питанні Європейська рада відійшла від пропозиції Комісії, яка наполягала на цілі в 30%.

Єврокомісія 16 лютого 2016 р. представила пакет заходів щодо забезпечення енергетичної безпеки ЄС, спрямованих на підвищення безпеки і захисту європейських споживачів від можливих енергетичних криз. Пакет заходів включає: стримування попиту на енергію, зростання виробництва енергії в Європі (в тому числі з ВДЕ); подальший розвиток добре функціонуючого та повністю інтегрованого внутрішнього енергетичного ринку; диверсифікацію енергетичних джерел, постачальників, маршрутів. Як зазначив 16 лютого 2016 р. Мігель Аріас Каньете, єврокомісар з енергетичної політики і клімату: «Сьогоднішні пропозиції спрямовані на створення надійної, конкурентоспроможної та гнучкої системи поставок енергії».

Європейська Комісія 25 лютого 2015 р. представила стратегію побудови «Енергетичного Союзу» в Європі. Енергетичний Союз будуватиметься на наступних принципах:

1) **солідарність**, тобто зменшення залежності від постачальників-монополістів. ЄС введе більшу прозорість контрактів, які країни ЄС укладають для купівлі електроенергії або газу з-за меж ЄС;

2) *енергопотоки вважаються «п'ятою свободою»* (поруч зі свободою пересування людей, товарів, капіталу і послуг). Це означає, що ЄС посилить вже наявні заходи щодо роз'єднання енергетичних монополій і зміцнення незалежних регуляторів. Буде перебудований європейський ринок електроенергії, щоб зробити національні ринки більш інтегрованими і з'єднаними між собою, а також з метою підвищення ролі ВДЕ;

3) *енергоефективність* розглядається як ще одне джерело енергії, поряд з іншими. Питання про збільшення виробництва енергії є рівноправним з питанням щодо підвищення енергоефективності;

4) *перехід до низьковуглецевої економіки*, тобто забезпечення того, що енергія, вироблена з відновлюваних джерел, буде ефективно інтегрована до енергетичних мереж. Цей пункт стратегії також передбачає перетворення ЄС в технологічного лідера у сфері зеленої енергії, у тому числі через розвиток нового покоління відновлюваної енергетики та надбання лідерської ролі у сфері виробництва електромобілів.

В рамках стратегії Європейська Комісія розглядає можливість колективної (всеевропейської) покупки газу під час кризи, особливо в ситуаціях, де держава ЄС залежна від монопольного постачальника.

Проведений аналіз загроз глобального потепління, вичерпність викопних палив та інші чинники змушують країни світу суттєво змінювати структуру енергетичного сектору. Країни Європи розробляють і реалізують плани та стратегії щодо скорочення загального енергоспоживання за рахунок впровадження енергоефективних технологій та заміщення традиційних енергоносіїв відновлюваними джерелами енергії. Як приклад, зазначимо наступне. У 2011 році в Данії було прийнято Енергетичну стратегію до 2050 року, яка передбачає досягнення довгострокової мети – повної незалежності країни від викопних палив. Стратегія також визначає нові коротко- та середньострокові заходи для виконання національних цілей 2020 року – 33 % ВДЕ у валовому кінцевому енергоспоживанні. Данія поставила собі за мету увійти до першої трійки країн світу з точки зору успішності впровадження ВДЕ до 2020 року та стати однією з найбільш енергоефективних країн-членів ОЕСР також до 2020 року. Розвиток енергетики в Швеції визначається Законом про інтегровану кліматичну та енергетичну стратегію (2008 р.), яким встановлено низку доволі амбітних цілей. Планується досягти 50 % ВДЕ у валовому кінцевому споживанні енергії до 2020 р., відмовитися від викопних палив в транспортному секторі до 2030 р. та досягти повної декарбонізації до 2050 року. Прийнята у 2010 р. Енергетична стратегія Німеччини до 2050 року передбачає повну відмову від використання атомної енергії до 2022 року. У 2050 році внесок ВДЕ до обсягів кінцевого енергоспоживання у Німеччині має становити 60 %, до споживання електроенергії – 80%. При цьому загальне споживання первинної енергії зменшиться на 20 % до 2020 р. та на 50 % до 2050 р. від рівня 2008 р.

Енергетика України на шляху сталого розвитку

В Україні для реалізації ЦСР7 розроблена система завдань та відповідні індикатори (див. табл. 1) з визначенням їх чисельних значень для горизонтів планування на 2020, 2025 та 2030 роки (див. табл. 2) [7, 8]. Національна доповідь «Цілі Сталого Розвитку: Україна» є підґрунтям для подальшого стратегічного планування розвитку нашої країни [8].

Таблиця 1 – Система завдань та відповідні індикатори ЦСР7

Завдання	Індикатори
Завдання 7.1. Розширити інфраструктуру та модернізувати мережі для забезпечення надійного та сталого енергопостачання на основі інноваційних технологій	Індикатор 7.1.1. Виробництво електроенергії, млрд. кВт·год
	Індикатор 7.1.2. Технологічні втрати електроенергії в розподільних електромережах, %
	Індикатор 7.1.3. Втрати тепла в тепломережах, %
Завдання 7.2. Забезпечити диверсифікацію постачання первинних енергетичних ресурсів	Індикатор 7.2.1. Максимальна частка імпорту первинних енергоресурсів (крім ядерного палива) з однієї країни (компанії) в загальному обсязі їх постачання (імпорту), %
	Індикатор 7.2.2. Частка одного постачальника на ринку ядерного палива, %
Завдання 7.3. Збільшити частку енергії з відновлюваних джерел у національному енергетичному балансі, зокрема, за рахунок введення додаткових потужностей об'єктів, що виробляють енергію з відновлюваних джерел.	Індикатор 7.3.1. Частка енергії, виробленої з відновлюваних джерел, у загальному кінцевому споживанні енергії, %
Завдання 7.4. Підвищити енергоефективність економіки	Індикатор 7.4.1. Енергоємність ВВП (витрат первинної енергії на одиницю ВВП), кг н.е. на 1 дол. США за ПКС 2011

Таблиця 2 – Цільові значення індикаторів ЦСР7 для України

Індикатор	Рік			
	2015 р.	2020 р.	2025 р.	2030 р.
Індикатор 7.1.1	157,7	163,8	178,4	182,0
Індикатор 7.1.2	11,5	11,0	10,0	9,0
Індикатор 7.1.3	20	18	14	12
Індикатор 7.2.1	40	< 15	< 12	< 12
Індикатор 7.2.2	> 95	< 70	< 60	< 50
Індикатор 7.3.1	4,9	11,0	14,2	17,1
Індикатор 7.4.1	0,28	0,20	0,17	0,14

На початку XXI ст. для координації енергетичної політики нашої держави була розроблена Енергетична стратегія України до 2030 року (затверджена розпорядженням Кабінету Міністрів України 15 березня 2006 р. № 145). У цій Стратегії визначено загальний потенціал енергозбереження за рахунок технічного (технологічного) та структурного факторів в економіці України у 2030 р. за базовим сценарієм розвитку економіки та її секторів складатиме 318,36 млн. т у.п., у тому числі з урахуванням: галузевого технічного (технологічного) фактора – 175,93 млн. т у.п.; міжгалузевого технічного (технологічного) фактора – 22,13 млн. т у.п.; галузевого структурного фактора – 61,65 млн. т у.п.; міжгалузевого структурного фактора – 58,65 млн. т у.п. У Енергетичній стратегії до 2030 року визначено, що за рахунок реалізації потенціалу енергозбереження енергоємність ВВП у 2030 р. може скласти 0,24 кг у.п./грн. При цьому в 2010 р. енергоємність ВВП прогнозувалася на рівні 0,37 кг у.п./грн., в 2015 р. – 0,31 і в 2020 р. – 0,28 кг у.п./грн. У 2030 р. порівняно з 2005 р. загальна економія паливних ресурсів за рахунок технічного фактора оцінювалася в обсязі 128,42 млн. т у.п., електричної енергії – 108,72 млрд. кВт·год, теплової енергії – 231,87 млн. Гкал, що в цілому складає 198,06 млн. т у.п.

Наступний подібний документ у липні 2013 р. розглядав уряд Азарова – це була оновлена Енергетична стратегія України до 2030 року (куратором оновлення був фонд «Ефективне управління» Рината Ахметова; цей фонд координував роботу команди із залученням Міненерговугілля та консультантів міжнародної консалтингової компанії McKinsey&Company). У цьому оновленому варіанті Стратегії з урахуванням прогнозованого зниження витрат на будівництво об'єктів для генерації з ВДЕ та потенційних вигід для України від розвитку цієї галузі, цільовий показник сукупної потужності нетрадиційної та відновлюваної енергетики до 2030 р. має скласти щонайменше 10% від встановленої потужності або 5–7 ГВт (10–12 ГВт включаючи великі ГЕС), а обсяг виробництва електроенергії – 11–16 ТВт·год (23–28 ТВт·год включаючи великі ГЕС). Вважалося, що ці показники можуть збільшитися за здійснення якісного стрибка в розвитку технологій будівництва об'єктів ВДЕ і, як наслідок, завдяки значному зниженню загальної собівартості генерації з ВДЕ до рівня собівартості традиційної генерації. На основі досвіду більшості європейських країн з впровадження ВЕС, цільовий рівень встановленої потужності вітрових електростанцій (ВЕС) в Україні до 2030 р. мав скласти 3–4 ГВт, виробництво електроенергії – 7–9 ТВт·год. Беручи до уваги досвід з впровадження сонячних електростанцій (СЕС) європейських країн зі схожим рівнем сонячного випромінювання, а також з огляду на зниження собівартості будівництва СЕС внаслідок розвитку технологій, цільовий рівень встановленої потужності СЕС в Україні до 2030 р. зможе скласти 1,5–2,5 ГВт, а рівень їх виробництва електроенергії – до 2–3,3 ТВт·год на рік за значного падіння вартості будівництва даного виду генерації. До 2030 р. потужність малих ГЕС зможе досягнути 0,4–0,8 ГВт, а обсяг виробництва електроенергії може скласти до 1,8–3,5 ТВт·год.

У 2010 році було затверджено Державну цільову економічну програму енергоефективності і розвитку сфери виробництва енергоносіїв з відновлюваних джерел енергії та альтернативних видів палива на 2010–2017 роки (постанова КМУ від 1 березня 2010 р. № 243). Ця програма визначала, зокрема, такі цілі: 1) знизити рівень енергоємності ВВП протягом строку дії Програми на 20% порівняно з 2008 роком (щороку на 3,3%); 2) оптимізувати структуру енергетичного балансу держави, у якому частка енергоносіїв, отриманих з відновлюваних джерел енергії та альтернативних видів палива, становитиме у 2015 році не менш як 10%.

Постановою Кабінету Міністрів України від 8 листопада 2017 р. № 820 внесено зміни до постанов Кабінету Міністрів України від 1 березня 2010 р. № 243 та від 17 жовтня 2011 р. № 1056, зокрема, термін дії Державної цільової економічної програми енергоефективності і розвитку сфери виробництва енергоносіїв з відновлюваних джерел енергії та альтернативних видів палива подовжено до 2020 року включно з виділенням на енергоефективність із Державного бюджету України 2,03 млрд. грн. на період 2017–2020 роки.

У вересні 2010 року був підписаний Протокол про приєднання України до Договору про заснування

Енергетичного співтовариства, який у подальшому ратифікований Законом України від 15 грудня 2010 р. «Про ратифікацію Протоколу про приєднання України до Договору про заснування Енергетичного Співтовариства». Згідно із зазначеним Законом з 1 лютого 2011 р. Україна стала повноправним членом Енергетичного Співтовариства.

У жовтні 2012 року ухвалено Рішення Ради Міністрів Енергетичного Співтовариства D/2012/04/МС-ЕнС «Про впровадження Директиви 2009/28/ЄС і внесення змін до Статті 20 Договору про заснування Енергетичного Співтовариства», згідно з яким кожна Сторона за Договором повинна ввести в дію закони, нормативно-правові та адміністративні положення, необхідні для виконання вимог Директиви Європейського Парламенту та Ради 2009/28/ЄС від 23 квітня 2009 р. про заохочення до використання енергії, виробленої з відновлюваних джерел.

Прийняття Україною Національного плану дій з енергоефективності до 2020 року є одним із основних зобов'язань в рамках імплементації Директиви 2006/32/ЄС щодо енергетичної ефективності кінцевого використання енергії та енергетичних послуг [10]. Кабінет Міністрів України розпорядження від 1 жовтня 2014 р. № 902-р Київ затвердив «Національний план дій з відновлюваної енергетики на період до 2020 року». Національним планом поставлено за мету досягти 11% ВДЕ у валовому кінцевому енергоспоживанні у 2020 році, що відповідає зобов'язанням України, прийнятим перед Енергетичним Співтовариством. Національна індикативна ціль для ВДЕ у валовому кінцевому обсязі споживання енергії до 2020 року в системах опалення та охолодження, у виробництві електроенергії та транспортному секторі наведена в табл. 3 (у відсотках).

Таблиця 3 – Національні індикативні цілі для ВДЕ у валовому кінцевому обсязі споживання енергії до 2020 року

Напрямок використання енергії з відновлюваних джерел	2009 рік	2014 рік	2015 рік	2016 рік	2017 рік	2018 рік	2019 рік	2020 рік
Відновлювані джерела енергії в системах опалення та охолодження	3,4	5,7	6,7	7,7	8,9	10,0	11,2	12,4
Відновлювані джерела енергії в електроенергетиці	7,1	7,6	8,3	8,8	9,7	10,4	10,9	11
Відновлювані джерела енергії у транспортному секторі	1,5	4,1	5	6,5	7,5	8,2	9	10
Загальна частка відновлюваних джерел енергії	3,8	5,9	6,7	7,4	8,3	9,1	10,1	11

У листопаді 2015 року в Україні було прийнято Національний план дій з енергоефективності на період до 2020 року (розпорядження КМУ № 1228-р від 25.11.2015). Планом передбачено досягнення у 2020 році національної індикативної мети з енергозбереження в обсязі 9 % від середнього показника кінцевого енергоспоживання за період 2005–2009 рр., що еквівалентне 6,5 млн. т н.е. З його прийняттям Україна отримала можливість запровадити європейську практику планування та прогнозування розвитку енергетики, реалізації політики підвищення енергоефективності. Згідно з Планом, передбачено досягнення у 2020 році національної індикативної мети щодо енергозбереження у розмірі 9 % від середнього показника кінцевого внутрішнього енергоспоживання за період протягом 2005–2009 рр., що становить 6,5 млн. т н.е. Крім того, Національний план дій визначає проміжну мету – у 2017 році скоротити енергоспоживання в розмірі 5 %. Основні завдання:

- досягнути обсягів збереженої енергії у 2020 р. у розмірі 9 % від середніх обсягів кінцевого споживання, а саме 6283 тис. т н.е.;
- знизити енергоемність виробництва одиниці продукції, виконання робіт, надання послуг на 9 % від рівня 2012 р.;
- скоротити рівень витрат теплової енергії в громадських житлових будівлях на 50 % від рівня 2012 р.;
- скоротити середнє питоме річне енергоспоживання житлового фонду України та привести його до норм та стандартів ЄС;
- зменшити на 15–20 % обсяги використання природних ресурсів за рахунок зменшення обсягів їх споживання;
- забезпечити зменшення на 15–20 % обсягів викидів забруднюючих речовин;
- підвищити рівень надання комунальних послуг для всіх верств населення.

Очікувана економія від реалізації Національного плану дій з енергоефективності на період до 2020 року: у 2017 р. – 3613 тис. т н.е.; у 2020 р. – 6501 тис. т н.е. Загальне фінансування на період 2015–2020 рр. – 35070 млн. євро.

Досягти наведених показників планується шляхом реалізації заходів у чотирьох основних секторах

кінцевого споживання енергії: побутовий сектор (очікується найбільший ефект), сектор послуг (також входить енергоспоживання бюджетних установ), у промисловості та на транспорті. Серед основних заходів: сприяння залученню інвестицій в термомодернізацію житлових будівель та у будівництво споруд з близьким до нульового споживанням енергії; адаптація стандартів палива та технологій його використання до європейських; запровадження сертифікації енергетичної ефективності будівель, системи енергоаудиту та енергоменеджменту; встановлення мінімальних вимог до енергоефективності будівель та енергоспоживчих продуктів (обладнання), забезпечення функціонування системи енергетичного маркування електрообладнання побутового призначення; забезпечення 100 % комерційного обліку споживання газу, теплової енергії та води і впровадження рахунків про оплату спожитої енергії з інформаційно-аналітичними даними щодо динаміки обсягів споживання енергії та комунальних послуг тощо.

Розпорядженням Кабінету Міністрів України від 18 серпня 2017 р. № 605-р. схвалена Енергетична стратегія України на період до 2035 року «Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність». Ключові показники ефективності Енергетичної стратегії України на період до 2035 року наведено в табл. 4.

Таблиця 4 – Ключові показники ефективності Енергетичної стратегії України на період до 2035 року

Опис ключового показника ефективності	2015 рік	2020 рік	2025 рік	2030 рік	2035 рік
Підвищення енергоефективності					
Енергоємність ВВП, ЗППЕ* у т н.е./тис. дол. ВВП (ПКС)	0,28	0,20	0,18	0,15	0,13
Витрати палива на обсяг спрямованої на енергоринок електроенергії, виробленої на ТЕС, г у.п./кВт·год	396	384	367	353	334
Питомі витрати при виробництві тепла котельнями, кг у.п./Гкал	165	160	155	150	145
Частка втрат в електромережах, %	>12%	10%	9%	8%	<7,5%
Частка втрат у тепломережах, %	>20%	<17%	<13%	<11%	<10%
Безпека і екологія					
Частка ВДЕ (включно з гідрогенеруючими потужностями та термальною енергією) у ЗППЕ, %	4%	8%	12%	17%	25%
Частка ВДЕ (включно з гідрогенеруючими потужностями) у генерації електроенергії, %	5%	7%	10%	>13%	>25%
Частка місцевих альтернативних видів палива в місцевих паливно-енергетичних балансах, % до загального споживання		10	15	18	20
Викиди CO ₂ до рівня 1990 року	-	<60%	<60%	<60%	<50%
Зниження викидів в CO ₂ екв. На кінцеве споживання палива, % від 2010 року		>5	>10	>15	>20
Частка потужностей у теплової генерації, що відповідає екологічним вимогам ЄС (викиди SO ₂ , NO _x , золи), %	<1%	<10%	<40%	85%	100%

* – ЗППЕ – загальне постачання первинної енергії

Фахівцями КПІ імені Ігоря Сікорського розроблено форсайт економіки України [42]. Головні кластери майбутньої економіки України та пріоритетність їх внеску в загальне зростання (у відсотках, у періодах 2015–2020 та 2020–2030 рр.) [42]: аграрний сектор (14 та 17); військово-промисловий комплекс (13 та 15); інформаційно-телекомунікаційні технології (8 та 12); створення нових речовин і матеріалів, нанотехнології (7 та 12); енергетика (7 та 11); високотехнологічне машинобудування (8 та 8); розвиток транзитної інфраструктури (2 та 5); «науки про життя» (біомедична інженерія, клітинна медицина, фармація) (1 та 5); туризм (2 та 5); інші кластери (переважно низькотехнологічні та сировинні) (40 та 10).

Показники енергетичної трилеми Світової енергетичної ради

Світова Енергетична Рада (World Energy Council, WEC) для реалізації проектів сталої енергетики розробила «Концепцію енергетичної трилеми», яка стала відповіддю на сучасну потрійну енергетичну задачу, яка полягає в підтримці безпечної, доступної та екологічно чистої енергії. Баланс оцінюється за допомогою індексу, розробленого СЕР (World Energy Trilemma Index) [19, 20, 22].

Індекс, випущений до конференції COP-18 в Досі (Катар) у грудні 2012 року, є складовою частиною доповіді СЕР 2012 року з проблеми світової енергетичної трилеми (World Energy Trilemma report) під назвою «Час бути реалістами – аргументація на користь політики стійкої енергетики» («Time to get real – the case for sustainable energy policy»), який оцінює країни з урахуванням їх клімату і енергетичних показників [20]. З доповіді випливає, що більшість країн до сих пір не зуміли знайти збалансований підхід до вирішення трьох суперечливих нагальних проблем, які СЕР називає «енергетичною трилемою».

Розроблена СЕР «Концепція енергетичної трилеми» фокусується на трьох основних векторах розвитку ПЕК: енергобезпека, доступність енергії та екологічна стійкість. Досягнення балансу між цими складовими неможливо без міжнародної співпраці на різних рівнях та інтеграції енергосистем. Кожній державі, згідно з концепцією, необхідно дотримуватися балансу між трьома «стовпами» трилеми. Так, країни, що визначають екологію як найвищий пріоритет (за рахунок використання геотермальної та гідроенергетики), такі як Ісландія, Колумбія і Філіппіни, можуть виявитися занадто залежними від одного джерела енергії, що знижує рівень енергобезпеки. Нафтовидобувним державам, навпаки, слід розширювати використання відновлюваних джерел енергії. Енергетична трилема включає [19]:

Таблиця 5 – Складові для методики розрахунку індексу енергетичної стійкості СЕР

Сфера, внесок у відсотках	Показник (з визначенням частки внеску)
Енергетична безпека – 25%	1.1.1 Відношення виробництва первинних енергоресурсів до споживання – 1/5
	1.1.2 Різноманітність джерел генерації електроенергії – 1/5
	1.1.3 Оптова надбавка на моторні палива – 1/5
	1.1.4 П'ятирічне зростання споживання первинних енергоресурсів – 1/5
	1.1.5a Для експортерів – різноманітність джерел експорту енергії – 1/5
	1.1.5b Для імпортерів – норма стратегічного запасу нафти – 1/5
Соціальна рівність – 25%	1.2.1 Доступність моторних палив в роздрібному продажі – 1/2
	1.2.2 Доступність і якість електроенергії з урахуванням доступу – 1/2
Мінімізація впливу на навколишнє середовище – 25%	1.3.1 Енергоемність ВВП на душу населення – 1/4
	1.3.2 Кількість викидів на ВВП на душу населення – 1/4
	1.3.3 Викиди CO ₂ від виробництва електроенергії і тепла – 1/4
	1.3.4 Вплив забруднення повітря і води – 1/4
Політичне середовище – 8,3%	2.1.1 Політична стабільність – 1/3
	2.1.2 Якість нормативно-правового регулювання – 1/3
	2.1.3 Ефективність уряду – 1/3
Соціальне середовище – 8,3%	2.2.1 Контроль корупції – 1/4
	2.2.2 Верховенство закону – 1/4
	2.2.3 Якість освіти – 1/4
	2.2.4 Якість охорони здоров'я – 1/4
Економічне середовище – 8,3%	2.3.1 Вартість життя – 1/3
	2.3.2 Макроекономічна стабільність – 1/3
	2.3.3 Доступність кредиту для приватного сектора – 1/3

1) енергетичну безпеку – ефективну організацію поставки первинної енергії з національних і зарубіжних джерел, надійність енергетичної інфраструктури та здатність постачальників енергії задовольнити поточний і майбутній попит;

2) енергетична рівність – наявність і доступність енергії для населення;

3) екологічну стійкість – визначає ефективність пропозиції та попиту енергії, а також розвиток пропозиції енергії з ВДЕ і інших низьковуглецевих джерел [5].

Індекс енергетичної стійкості являє собою комплексну оцінку енергетичного сектора держави в аспекті сталого розвитку в світовому масштабі.

Запропоновано 10 кроків до змін енергетики згідно «Концепції енергетичної трилеми» WEC:

1) забезпечити зв'язок енергетичної трилеми з більш масштабною державною програмою;

2) здійснювати керівництво, спрямоване на досягнення консенсусу в національному і міжнародному масштабі;

3) налагодити більш ефективний діалог між представниками промисловості та вищої державної влади;

4) мінімізувати політичні та законодавчі ризики і досягти оптимального розподілу ризиків;

5) ринковий підхід до тарифікації викидів вуглекислого газу з метою підвищення інвестиційної привабливості;

- 6) розробити прозорі, гнучкі і динамічні системи тарифікації;
- 7) сприяти лібералізації (екологічної) господарської діяльності;
- 8) активніше взаємодіяти з фінансовими установами;
- 9) задовольняти потребу в більш активних дослідженнях, розробках і демонстрації;
- 10) підтримувати спільні пілотні галузеві ініціативи, включаючи великомасштабну річну демонстрацію і розгортання.

Останні Доповіді СЕР говорять про те, що енергосистеми все ще далекі від сталого свого розвитку [19, 20, 22]. У звіті «World Energy Trilemma: Time to get real – the agenda for change» СЕР представляє ранги країн відповідно до індексу енергетичної сталості (Energy Sustainability Index) [20]. Індекс енергетичної сталості показує, що більшість з більш ніж 90 розглянутих країн все ще далекі від того, щоб забезпечити повну стійкість своїх енергосистем. Сьогодні дев'ять з десяти країн-лідерів у рейтингу індексу – європейські (на 9 місці Нова Зеландія, Україна займає 63 позицію з 125). У табл. 5 представлені складові для методики розрахунку індексу енергетичної стійкості СЕР.

Україна у 2016 році, посівши 63 місце в загальному рейтингу країн за Energy Trilemma Index, покращила свої позиції у загальному рейтингу на 2 позиції з 2015 р. [18]. У питаннях енергетичної безпеки та рівності Україна досягла значних успіхів, маючи рейтингові оцінки А (28) та В (61) відповідно. Слабким місцем нашої країни є екологічна стійкість, даний показник відповідає рейтинговій оцінці D (108). Однак на сьогодні український енергетичний сектор зіткнувся з досить великими проблемами, що й демонструють наведені показники. У табл. 6 представлено порівняння складових енергетичної трилеми України та окремих країн Європи.

Таблиця 6 – Порівняння країн за показниками енергетичної трилеми

Країна	Номер в рейтингу	Індекс енергетичної безпеки	Індекс енергетичної рівності	Індекс екологічної стійкості
Україна	63	A(28)	B(61)	D(108)
Польща	36	B(60)	A(28)	B(64)
Росія	45	A(6)	B(42)	D(116)
Німеччина	5	A(7)	A(15)	A(31)
Швеція	3	A(10)	A(27)	A(8)
Словаччина	16	A(15)	A(18)	A(30)
США	14	A(4)	A(13)	C(73)
Данія	1	A(1)	A(10)	A(6)

Дані, наведені у табл. 7, відображають відмінності у структурі енергетичного балансу України та окремих країн, розвиток яких для нас є орієнтиром. Можна помітити, що для країн, які займають передові місця у світовому рейтингу, є властивим широке використання ВДЕ.

Щодо використання ВДЕ в нашій країні зауважимо наступне. За даними Мінпаливенерго установлена потужність ВЕС та СЕС на початок 2017 р. складала відповідно 438 та 531 МВт, що становило 1,6 % питомої ваги потужностей українських електростанцій (без урахування об'єктів відновлюваної електроенергетики, що знаходяться на тимчасово окупованій території АР Крим). Виробництво електроенергії у 2016 р. ВЕС та СЕС становила відповідно 925 та 492 млн. кВт·год, тобто сумарно 0,9 % від загального виробництва електроенергії (147777 млн. кВт·год). За період 2014–2016 рр. установлена потужність ВЕС зросла на 6,6 % та СЕС – на 29 %, тоді як річне виробництво електроенергії для ВЕС знизилася на 18,1 %, а для СЕС – зросло на 14,7 %.

Таблиця 7 – Порівняння енергетичного балансу країн за виробництвом та постачанням енергії

	Україна	Німеччина	Польща	Данія	США
Різноманітність загального обсягу постачання первинної енергії, %					
–вугілля	35,82	25,48	54,12	18,11	19,79
–природний газ	34,04	22,81	14,01	19,11	27,93

Продовження таблиці 7

–нафта	8,55	32,11	22,68	35,23	35,74
–ВДЕ/атомна	1,71/18,85	11,07/7,91	8,98	27,55	5,66/9,81
–гідро	1,02	0,62	0,21	–	1,07
Різноманітність виробництва електроенергії, %					
–традиційна теплова	48,72	59,79	89,10	49,28	68,56
–гідроенергетика	5,52	3,33	1,18	0,06	6,7
–ядерна енергетика	45,36	16,08	–	–	19,01
–ВДЕ	0,4	20,8	9,72	50,68	5,73

Аналіз розвитку енергетики України на базі даних Enerdata Yearbook

Для детального співставлення показників України та окремих країн використовуємо інформацію бази даних Enerdata Yearbook [14]. За даними Всесвітнього банку даних Enerdata Yearbook є можливість відслідковувати для окремих країн та регіонів в цілому динаміку таких показників як енергоємність, споживання та виробництво енергії тощо. Для подальшого аналізу виберемо групу країн у складі Україна, Німеччина, Польща та Росія. Наведемо окремі показники, які досить повно характеризують роль та місце України у світовому енергобалансі.

З даних, наведених на графіках рис. 1 та 2, випливає, що в питанні енергоємності Україна слідує світовим тенденціям щодо зменшення інтенсивності використання енергії. Але, на жаль, рівень енергоємності в Україні залишається одним із найвищих в світі – 0,318 кг.н.е./\$2005р. за даними Enerdata та є другим за величиною після Росії. У табл. 8 показано першу та останню п'ятірку країн щодо їх рівнів енергоємності (згідно переліку країн, що входять до бази даних Enerdata Yearbook (енергоємність економіки України перевищує середньосвітовий показник в 2,21 рази.

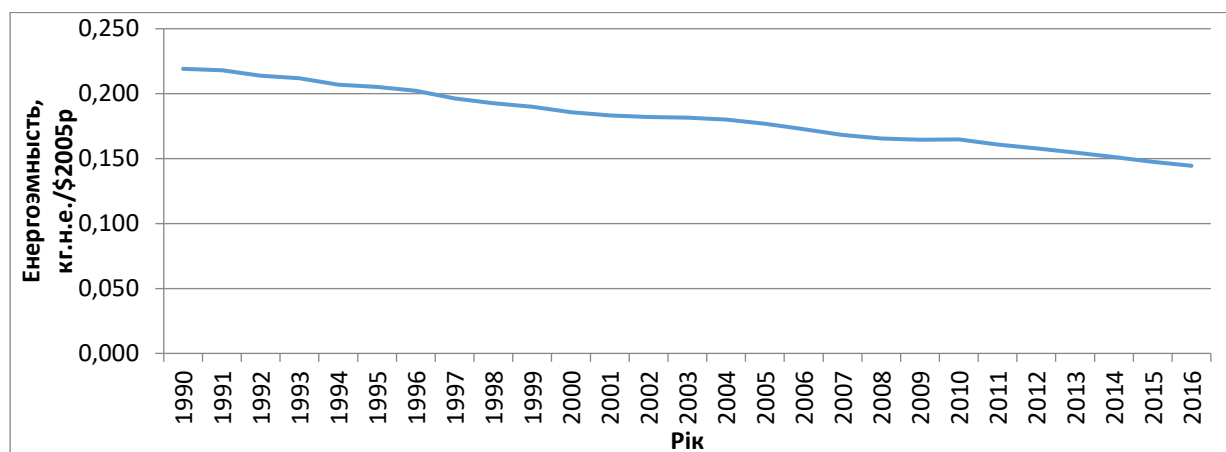


Рисунок 1 – Динаміка світової енергоємності.

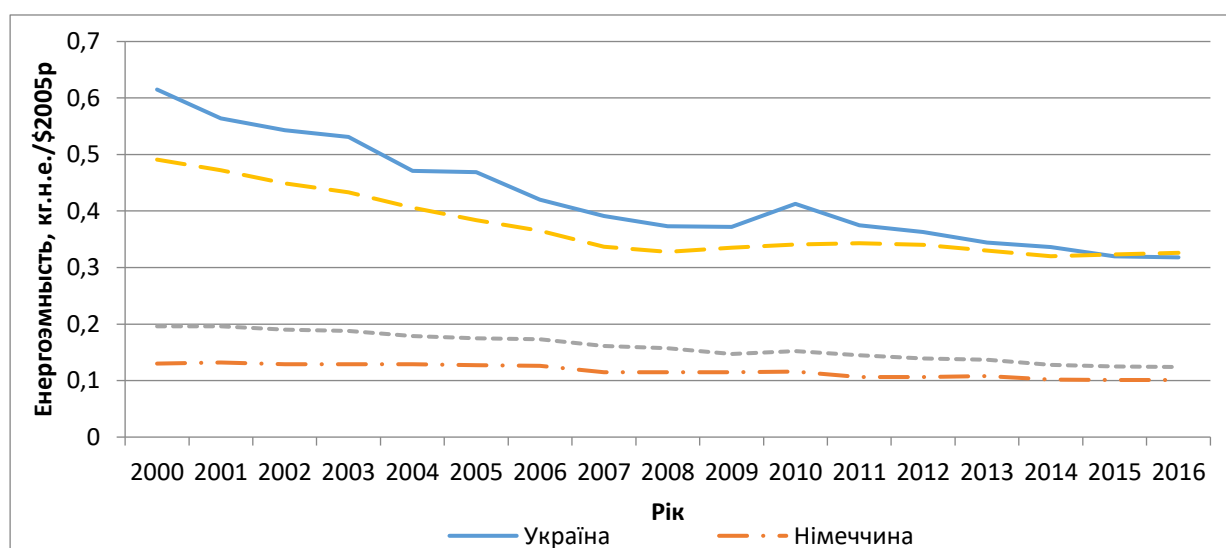


Рисунок 2 – Порівняння зміни енергоємності України відносно Німеччини, Польщі та Росії

Таблиця 8 – Рейтинг країн за рівнем енергоємності

Енергоємність, кг.н.е./\$2005р.			
Перша п'ятірка		Остання п'ятірка	
Росія	0,326	Іспанія	0,093
Україна	0,318	Єгипет	0,092
Узбекистан	0,262	Індонезія	0,087
ПАР	0,239	Великобританія	0,074
Тайвань	0,22	Колумбія	0,057
Світ	0,144	Україна	0,318

На рис. 3–7 для України, Німеччини, Польщі та Росії наведено наступні характеристики: рис. 3 – динаміка виробництва сумарної енергії в млн. т н.е.; рис. 4 – частка ВДЕ (%) у виробництві енергії; рис. 5 – динаміка споживання сумарної енергії в млн. т.н.е; рис. 6 – динаміка виробництва електроенергії в ТВт-год; рис. 7 – внутрішнє споживання електроенергії вТВт-год. Рейтинг країн світу за рівнем виробництва та споживання енергії введено в табл. 9.

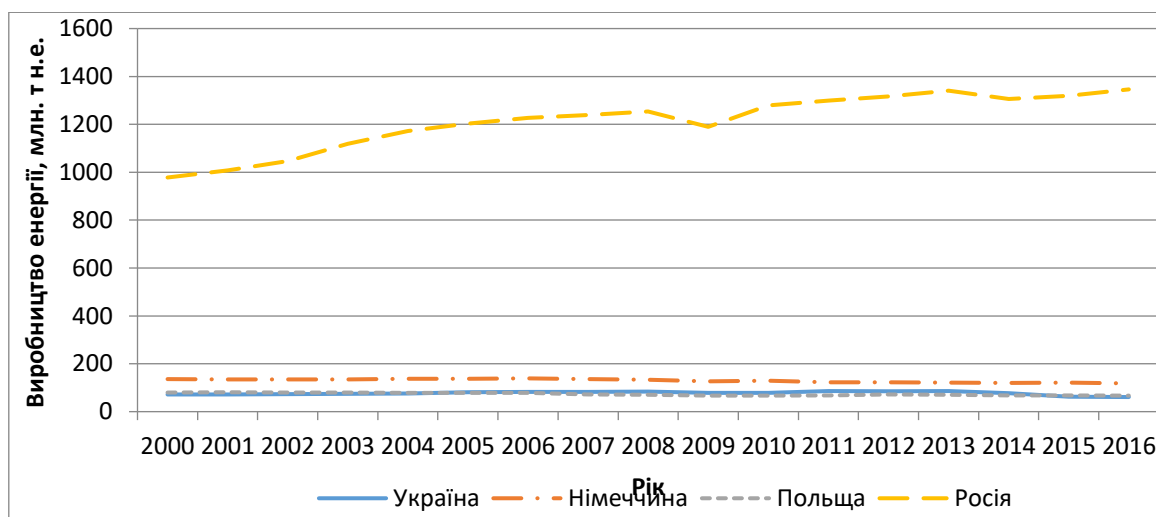


Рисунок 3 – Динаміка виробництва сумарної енергії (млн. т н.е.) в Україні порівняно з Німеччиною, Польщею та Росією

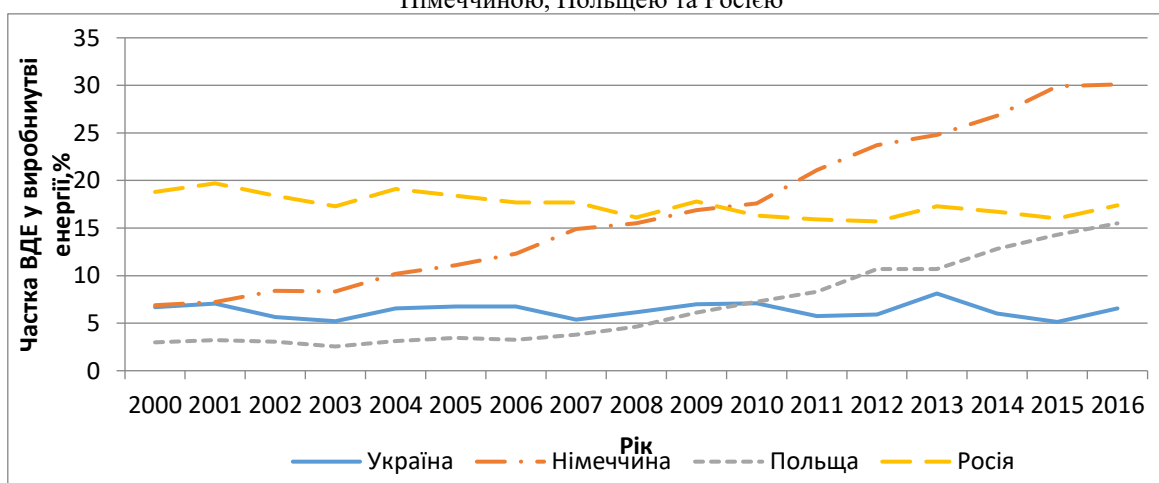


Рисунок 4 – Частка ВДЕ у виробництві енергії в Україні порівняно з Німеччиною, Польщею та Росією

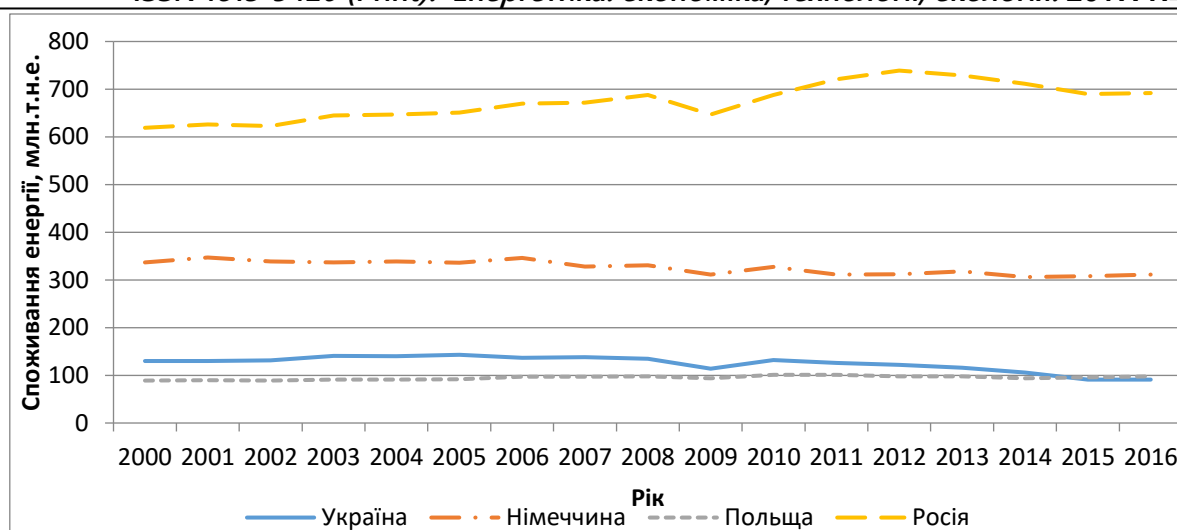


Рисунок 5 – Динаміка споживання сумарної енергії в Україні порівняно з Німеччиною, Польщею та Росією

Таблиця 9 – Рейтинг країн світу за рівнем виробництва та споживання енергії

Загальне виробництво енергії, млн. т н.е.			
Перша п'ятірка		Остання п'ятірка	
Китай	2538	Нова Зеландія	16
США	1952	Бельгія	15
Росія	1346	Чилі	12
Саудівська Аравія	685	Тайвань	11
Індія	586	Португалія	6
Світ	13910	Україна	61
Загальне споживання енергії, млн. т н.е.			
Перша п'ятірка		Остання п'ятірка	
Китай	3123	Колумбія	33
США	2204	Румунія	33
Індія	884	Норвегія	30
Росія	682	Португалія	22
Японія	437	Нова Зеландія	21
Світ	13903	Україна	91

Рівень споживання та виробництва електроенергії в Україні виглядає наступним чином:

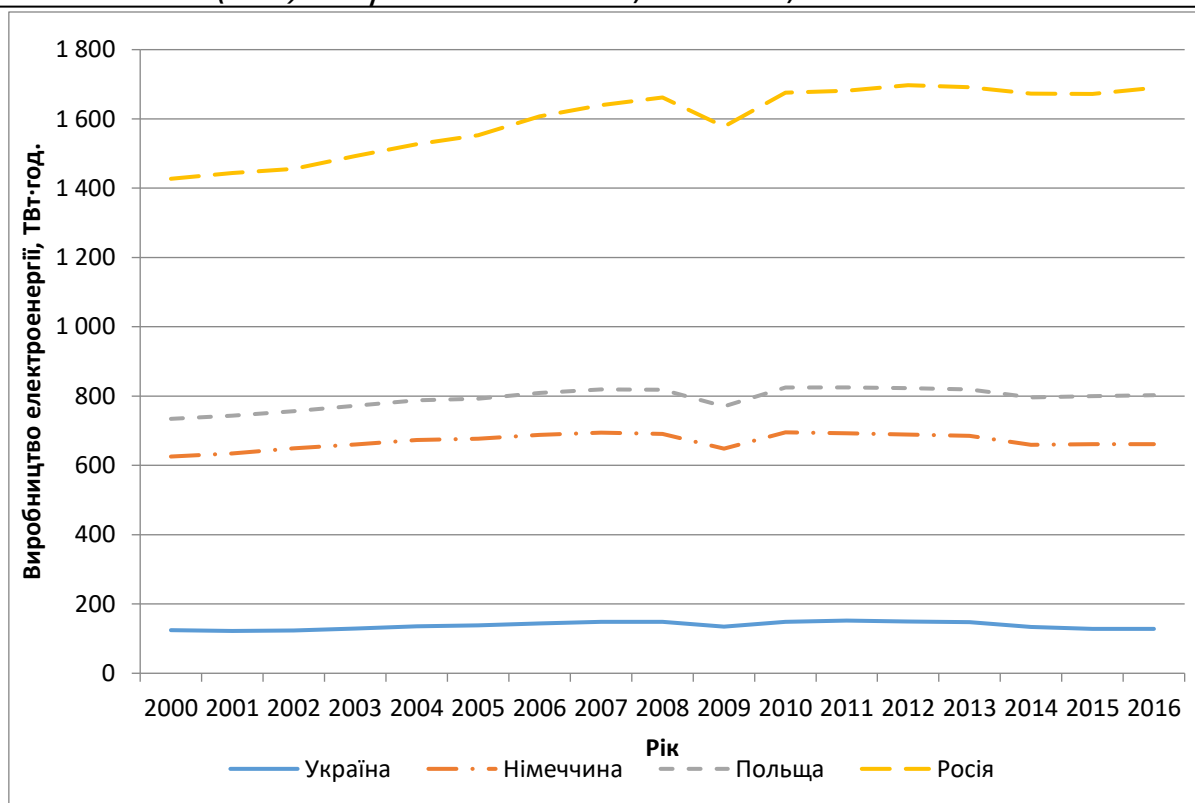


Рисунок 6 – Динаміка виробництва електроенергії в Україні порівняно з Німеччиною, Польщею та Росією

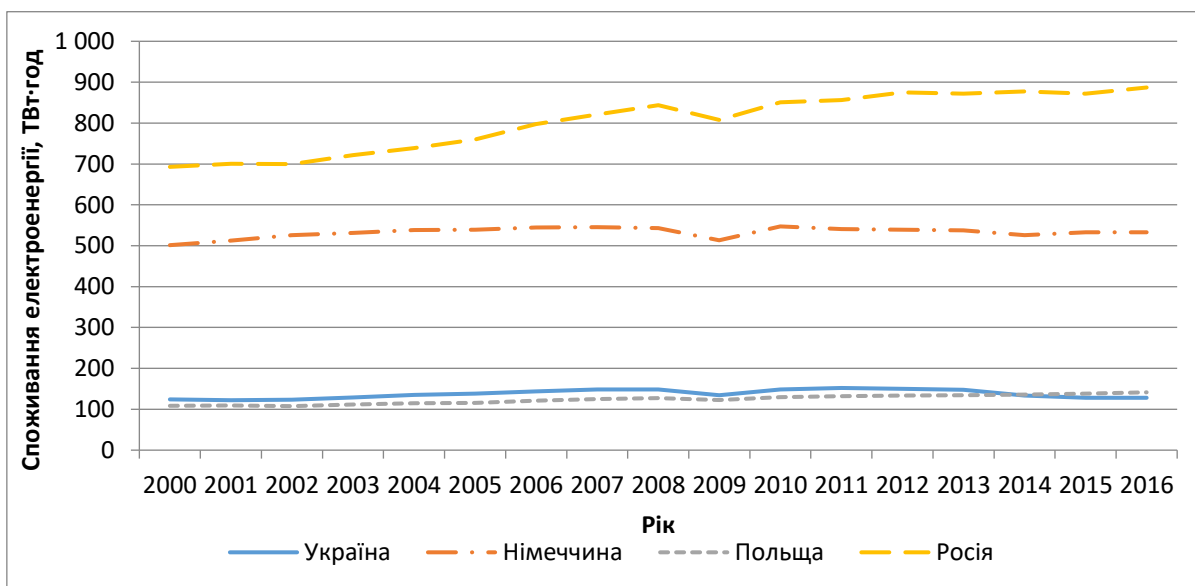


Рисунок 7 – Внутрішнє споживання електроенергії в Україні порівняно з Німеччиною, Польщею та Росією

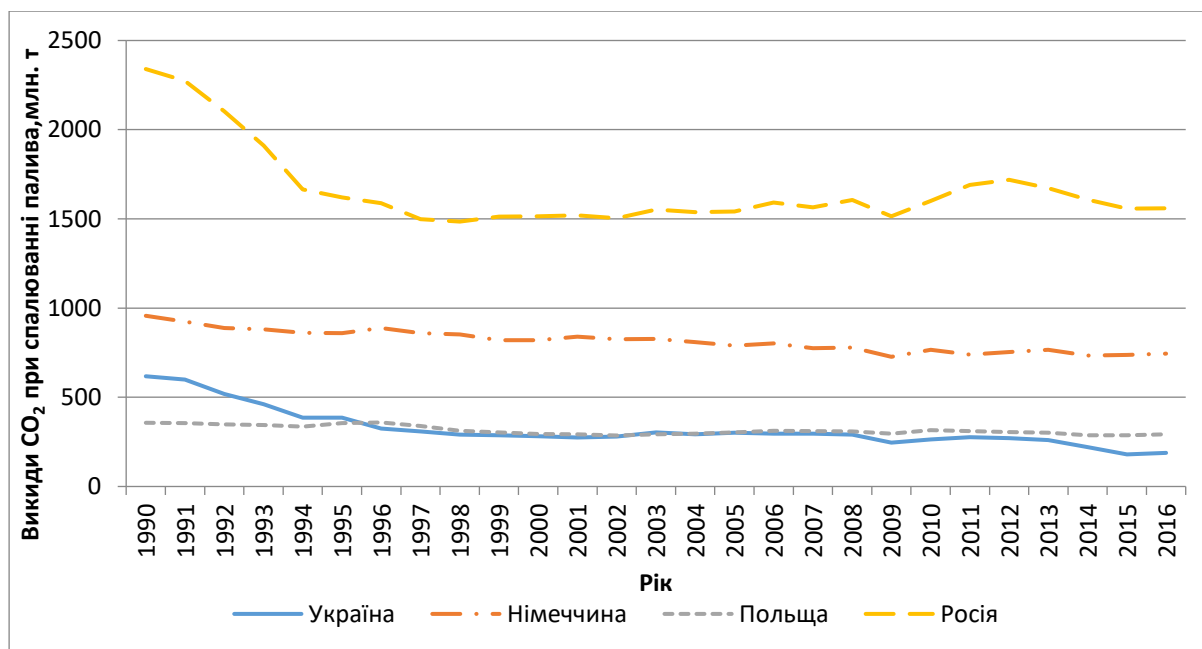
Як випливає із графіків на рис. 6 та 7, рівень виробництва електроенергії перевищує рівень споживання. Це пояснюється не тільки тим, що Україна є країною експортером електроенергії (у 2015 році Україна експортувала 3,75 млн. кВт·год електричної енергії в сусідні країни), але й суттєвими втратами на передачу та розподіл електричної енергії, в Україні цей показник за даними СЕР складає 12,3%.

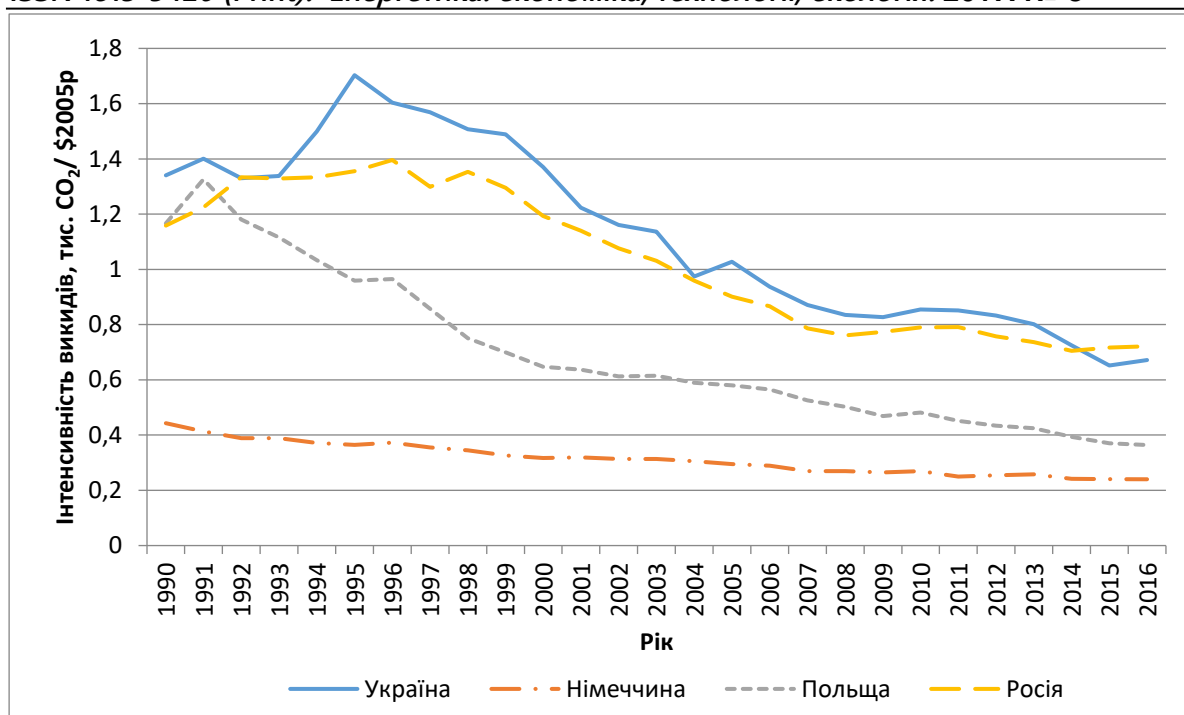
Рейтинг країн світу за рівнем споживання та виробництва електроенергії представлено в табл. 10, що не відповідає потенційним можливостям нашої держави.

Таблиця 10 – Рейтинг країн світу за рівнем споживання та виробництва електроенергії

Виробництво електроенергії, ТВт·год			
Перша п'ятірка		Остання п'ятірка	
Китай	6015	Румунія	68
США	4327	Португалія	61
Індія	1423	Узбекистан	59
Росія	1088	Нова Зеландія	44
Японія	1013	Нігерія	30
Світ	24660	Україна	164
Споживання електроенергії, ТВт·год			
Перша п'ятірка		Остання п'ятірка	
Китай	5129	Румунія	51
США	3867	Узбекистан	49
Індія	1065	Португалія	47
Японія	927	Нова Зеландія	39
Росія	887	Нігерія	24
Світ	21190	Україна	128

Ще одним вагомим показником у сталому розвитку країн світу є рівень та інтенсивність викидів вуглекислого газу. На рис. 8 та 9 показано динаміку величини викидів вуглекислого газу в атмосферу.

Рисунок 8 – Викиди CO₂ при спалюванні палива (млн. т) України у порівнянні з Німеччиною, Польщею та Росією

Рисунок 9 – Інтенсивність викидів CO₂ України у порівнянні з Німеччиною, Польщею та Росією

На сьогоднішній день рівень інтенсивності викидів вуглекислого газу в Україні залишається одним із найвищих світі (див. табл. 11), що пояснюється високим рівнем енергоємності виробництва та низьким рівнем ВВП в Україні.

Таблиця 11 – Рейтинг країн світу за обсягами викидів вуглекислого газу в навколишнє середовище

Викиди CO ₂ , млн. т CO ₂			
Перша п'ятірка		Остання п'ятірка	
Китай	8796	Нігерія	63
США	5112	Португалія	49
Індія	2088	Швеція	42
Росія	1560	Норвегія	38
Японія	1096	Нова Зеландія	33
Світ	31565	Україна	189
Інтенсивність викидів CO ₂ , кг CO ₂ /\$2005р.			
Перша п'ятірка		Остання п'ятірка	
Росія	0,722	Франція	0,148
ПАР	0,720	Норвегія	0,136
Україна	0,672	Колумбія	0,109
Казахстан	0,604	Швеція	0,098
Узбекистан	0,596	Нігерія	0,044
Світ	0,324	Україна	0,672

Нижче в табл. 12 та 13 наведено дані, які характеризують енергетичний сектор економіки України у сфері видобутку та споживання енергетичних ресурсів порівняно з країнами, які займають вищі та нижчі ступені за різними показниками (наведено перша та остання п'ятірки із виділенням загальносвітового показника та України). Представлені показники свідчать про значний невикорисаний потенціал паливно-енергетичного комплексу нашої країни.

Таблиця 12– Рейтинг країн світу за рівнем виробництва паливно-енергетичних ресурсів

Виробництво непереробленої нафти, млн. т			
Перша п'ятірка		Остання п'ятірка	
Саудівська Аравія	598	Іспанія	0,14
США	556	Португалія	0,07
Росія	547	Тайвань	0,01
Канада	219	Швеція	0
Китай	202	Бельгія	0
Світ	4359	Україна	2
Виробництво нафтопродуктів, млн. т			
Перша п'ятірка		Остання п'ятірка	
США	867	Нова Зеландія	6
Китай	539	Чехія	6
Росія	276	Узбекистан	3
Індія	248	Нігерія	2
Саудівська Аравія	173	Україна	0,69
Світ	4226	Україна	0,69
Виробництво природного газу, млрд. м ³			
Перша п'ятірка		Остання п'ятірка	
США	750	Південна Корея	0,15
Росія	628	Іспанія	0,05
Іран	190	Франція	0,03
Катар	167	Швеція	0
Канада	165	Бельгія	0
Світ	3579	Україна	20
Виробництво вугілля, млн. т			
Перша п'ятірка		Остання п'ятірка	
Китай	3210	Алжир	0
Індія	708	Тайвань	0
США	683	Японія	0
Австралія	509	Португалія	0
Індонезія	459	Нідерланди	0
Світ	7289	Україна	36
Частка ВДЕ у виробництві електроенергії, %			
Перша п'ятірка		Остання п'ятірка	
Норвегія	97,9	Південна Корея	2,3
Нова Зеландія	84	Алжир	0,27
Колумбія	82	ОАЕ	0,23
Бразилія	81,2	Саудівська Аравія	0
Канада	66,4	Кувейт	0
Світ	24,38	Україна	6,5

Таблиця 13 – Рейтинг країн світу за рівнем споживання паливно-енергетичних ресурсів

Споживання непереробленої нафти, млн. т			
Перша п'ятірка		Остання п'ятірка	
США	840	Чехія	6
Китай	563	Нова Зеландія	6
Росія	286	Узбекистан	3
Індія	249	Нігерія	2
Японія	165	Україна	0,66
Світ	4182	Україна	0,66
Споживання нафтопродуктів, млн. т			
Перша п'ятірка		Остання п'ятірка	
США	771	Португалія	9
Китай	520	Норвегія	9
Індія	203	Чехія	8
Японія	167	Нова Зеландія	7
Росія	149	Узбекистан	2
Світ	4194	Україна	11
Споживання природного газу, млрд. м ³			
Перша п'ятірка		Остання п'ятірка	
США	782	Нова Зеландія	5
Росія	423	Португалія	5
Китай	203	ПАР	5
Іран	188	Чілі	5
Японія	127	Швеція	1
Світ	3629	Україна	31
Споживання вугілля, млн. т			
Перша п'ятірка		Остання п'ятірка	
Китай	3546	Алжир	0,2
Індія	922	Венесуела	0,09
США	661	Нігерія	0,04
Німеччина	226	Кувейт	0
Росія	210	Саудівська Аравія	0
Світ	7421	Україна	55
Частка вітрової та сонячної енергії у виробництві електроенергії, %			
Перша п'ятірка		Остання п'ятірка	
Нова Зеландія	23,5	Саудівська Аравія	0
Іспанія	23,5	Узбекистан	0
Португалія	22,3	Кувейт	0
Німеччина	18	Нігерія	0
Італія	16,5	Венесуела	0
Світ	5,66	Україна	0,82

Аналіз розвитку енергетики України за даними World Development Indicators

Ще одним важливим критерієм є оцінки світового розвитку World Development Indicators. Згідно даних World Development Indicators за 2017 р. для характеристики енергетики України розглядатимемо оцінки, наведені у кластері «Навколишнього середовища» [17]. Проаналізовано дані щодо України у 2016 р. у порівнянні з даними Німеччини, Польщі та Європи і Центральної Азії: табл. 14 – виробництво та використання електроенергії; табл. 15 – виробництво електроенергії, джерела та доступ до електроенергії; табл. 16 – енергетична залежність, енергоефективність та викиди вуглецю; табл. 17 – стала енергія для всіх (доступ та споживання ВДЕ). Дані Світового Банку також підтверджують необхідність зміни структури паливно-енергетичного балансу України. Розвиток енергетичного сектора економіки України відбувається темпами, які не дозволяють виконати намічені планові показники, наведені в проаналізованих вище українських директивних документах.

Таблиця 14 – Порівняння країн за рівнем виробництва та використання електроенергії

	Україна	Німеччина	Польща	Європа і Цент. Азія
Виробництво енергії, млн. т н.е.	86,3	120,4	70,9	3831,7
Споживання енергії, млн. т н.е.	116,1	317,7	97,6	4625,4
Використання викопного палива, %	78,2	81,1	91,1	79,1
Горючі ВДЕ і відходи, %	1,6	8,7	8,5	5,6
Альтернативна та ядерна енергія %	19,9	11,1	0,8	14,8
Зростання використання енергії 1990-2013 р. %	-2,5	-0,4	-0,2	0

Таблиця 15 – Порівняння країн за балансом виробництва електроенергії

	Україна	Німеччина	Польща	Європа і Цент. Азія
Виробництво електроенергії млрд. кВт·год	193,7	632,9	164	5321,8
Джерела електроенергії у % від загального виробництва				
– вугілля	41,8	47,2	85,2	25,3
– природний газ	7,2	10,9	3,2	24,4
– нафта	0,2	1,1	1,1	1,3
– енергія води	7,1	3,6	1,5	16,8
– ВДЕ	0,7	20,4	8,9	9,5
– ядерна енергія	43	15,4	0	21,8
Доступ до електроенергії, %	100	100	100	100

Таблиця 16 – Порівняння країн за балансом виробництва електроенергії

	Україна	Німеччина	Польща	Європа і Цент. Азія
Мережевий імпорту енергії, %	27	61	28	17
Енергоефективність, \$/к.н.е.	3,4	11,5	9,8	9,1
Загальні викиди CO ₂ , млн. т	271101	757313	302333	6551554
Інтенсивність вуглецю, кг/к.н.е	2,3	2,4	3,1	2,3

Таблиця 17 – Порівняння країн за доступом до нетвердих джерел палива та використання ВДЕ

	Україна	Німеччина	Польща	Європа і Цент. Азія
Доступ сільського населення до не твердих палив, %	100	100	100	100
Споживання відновлювальної енергії, %	2,9	12	10,9	18,5
Виробництво відновлювальної електроенергії, %	5,7	23	10,4	20,9

Аналіз за даними World Economic Forum

Світовий економічний форум дозволяє оцінити стан енергетики за допомогою формування Global Energy Architecture Performance Index [21]. Станом на 2017 рік Україна займає 73 місце у загальному рейтингу, покращивши свої позиції на 4 місця, з наступними показниками: економічне зростання і розвиток – 0,3; екологічна стійкість – 0,65; енергетичний доступ і безпека – 0,79.

Для оцінки становища України порівнюємо її з показниками інших країн (див. табл. 18):

Таблиця 18 – Порівняння країн за даними World Economic Forum (Global Energy Architecture Performance Index)

	Позиція	Економічне зростання і розвиток	Екологічна стійкість	Енергетичний доступ і безпека
Швейцарія	1	0,74	0,77	0,88
Норвегія	2	0,67	0,75	0,88
Швеція	3	0,63	0,8	0,9
Данія	4	0,69	0,71	0,91
Франція	5	0,62	0,81	0,88
Австрія	6	0,67	0,74	0,88
Іспанія	7	0,65	0,73	0,87
Колумбія	8	0,73	0,68	0,83
Нова Зеландія	9	0,59	0,75	0,9
Уругвай	10	0,63	0,73	0,85
Німеччина	19	0,62	0,64	0,88
Польща	37	0,66	0,56	0,8
Росія	48	0,55	0,6	0,8
Україна	73	0,3	0,65	0,79

За даними World Economic Forum складною проблемою України є значення такого показника, як економічне зростання і розвиток. Зазначимо, що до економічної складової відносяться інтенсивність використання енергії, рівень експорту та імпорту енергоносіїв та ціни на енергоносії для промисловості та населення внаслідок оподаткування та субсидій.

Висновки

1. В Україні слід врахувати, що нова економіка майбутнього – це не поступальний розвиток старої промисловості, що базується переважно на силових енергетичних процесах, а неоіндустріалізація, заснована на поєднанні великих установок і розосередженої генерації, силових та інформаційних процесів, фізичних та інтелектуальних систем. На зміну індустріальній енергетичній цивілізації, пов'язаної з використанням переважно силових процесів, приходить новий енергоінформаційний електричний світ, заснований на широкому використанні інтелектуальних соціо-фізичних систем. Енергоінформаційні системи, крім утилітарного якісного енергозабезпечення, створюють і нову якість життя.

2. Одним із основних недоліків України є відсутність дієвої комплексної енергетичної політики, а також низький рівень використання ВДЕ та висока залежність від вугілля, природного газу та ядерної енергії як первинних джерел енергії. при цьому слід враховувати, що вплив окремих негативних факторів буде зростати. Так, на початку 2019 року Україна опиниться перед загрозою потужного удару по власній енергетичній безпеці у зв'язку із завершенням чинних газових контрактів з Росією.

3. Україна має відбудувати сучасну систему розвитку власної енергетики, виходячи з пріоритетності національних інтересів та покладаючись максимально на власні сили. Для покращення

економічної складової необхідно зменшити рівень використання імпортованих енергоносіїв, особливо імпорту природного газу, а також звернути увагу на екологічну стійкість України. Використання ВДЕ впливає не тільки на екологічний аспект енергетики, вплив на економічну та енергетичну безпеку є суттєвим.

4. Потрібні ефективні реформи у таких сферах як газова та нафтова галузі, нафтопереробка, електроенергетика, підтримка енергоефективності та використання ВДЕ. Практично відсутній процес широкого стимулювання залучення місцевої влади до фінансування енергоефективних проектів та ініціатив (натомість стрімко зростає сума державних субсидій, що демотивує громадян займатися скороченням енергоспоживання). Скорочення енергоспоживання за рахунок енергоефективності та енергозбереження, розвиток використання ВДЕ сприятимуть суттєвому зменшенню використання викопних видів палив в Україні до 2050 року та скороченню викидів ПГ. Україні важливо виконати ціль щодо скорочення викидів ПГ та сприяти досягненню глобальної цілі щодо недопущення збільшення температури на Землі більш ніж на 2 °C до 2100 року.

Список використаної літератури

1. Давуд Р. Устойчивая энергетика – это "золотая нить" – генсек ООН //17 Сентябрь 2015. – www.un.org/russian/news/story.asp?NewsID=24454.
2. Денисюк С.П. Формування політики підвищення енергетичної ефективності – сучасні виклики та європейські орієнтири // Енергетика: економіка, технології, екологія. – 2013. – №2. – С. 7–22.
3. Енергоефективність та відновлювані джерела енергії / Під заг. ред. А.К. Шидловського; Авт.: Бевз С.М., Бондаренко Б.І., Денисюк С.П. та інші. – К.: Українські енциклопедичні знання, 2007. – 500 с.
4. Зорина Т.Г. Устойчивое развитие энергетики: сущность и методические подходы к оценке // Современные технологии управления. ISSN 2226-9339. – №1 (49). № статьи: 4905. Дата публикации: 2015-01-08. Режим доступа: <http://sovman.ru/article/4905/>
5. Мировой Энергетический Совет [Электронный ресурс] / Мировой Энергетический Совет 2013. – Режим доступа: http://www.worldenergy.org/wp-content/uploads/2014/04/WEC_16_page_document_21_3_14_RU_FINAL.pdf. – Дата доступа: 04.12.2014.
6. Форсайт та побудова стратегії соціально-економічного розвитку України на середньостроковому (до 2020 року) і довгостроковому (до 2030 року) часових горизонтах / наук. керівник проекту акад. НАН України М. Згуровський. – К.: НТУУ «КПІ імені Ігоря Сікорського», Вид-во «Політехніка», 2016. – 184 с.
7. Цілі Розвитку Тисячоліття Україна: 2000–2015. Національна доповідь. – К.: Проект «Прискорення прогресу у досягненні Цілей Розвитку Тисячоліття в Україні», 2015. – 124 с.
8. Цілі Сталого Розвитку: Україна. Національна доповідь. – К.: Міністерство економічного розвитку і торгівлі України, 2017. – 174 с.
9. Энергетика и устойчивое развитие [Электронный ресурс] // Бюллетень МАГАТЭ 54-1-Март 2013. – Режим доступа: http://www.iaea.org/Publications/Magazines/Bulletin/Bull541/Russian/Bull54_1_Mar2013_ru.pdf. – Дата доступа: 27.10.2014.
10. Action Plan for Energy Efficiency: Realising the Potential. COM (2006) 545 final / Commission of the European Communities, Brussels, 19.10.2006. – 25 p.
11. An Energy Policy for Europe: Communication from the Commission to the European Council and the European Parliament: Doc. COM (2007) 1 final, Brussels, 10.01.2007 [Electronic resource] // EUR-Lex. Access to European Union law. – Mode of access: <http://eur-lex.europa.eu/smartapi/cgi/sga_doc?smartapi!celexplus!prod!DocNumber&lg=en&type_doc=COMfinal&an_doc=2007&nu_doc=1>.
12. Climate Science Special Report. Fourth National Climate Assessment. Volume I. – U.S. Global Change Research Program, 2017. – 477 p.
13. Denysiuk S. Green Industrial Development in Ukraine / S. Denysiuk, L. Galperina // Industrial Policy and Sustainable Growth. Editors: Murat Yülek. – Springer. – 26 p. ISBN: 978-981-10-3964-5 (Print), 978-981-10-3964-5 (Online).
14. Enerdata. Yearbook 2016 [Електронний ресурс]. <https://yearbook.enerdata.net>
15. Energy 2020. A strategy for competitive, sustainable and secure energy: Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions: Doc. COM (2010) 639 final. Brussels, 10.11.2010 [Electronic resource] // EUR-Lex. Access to European Union law. – Mode of access: <<http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2010:0639:FIN:EN:PDF>>.
16. Sustainable Energy For All Global Tracking Framework. Progress toward Sustainable Energy 2017. – The World Bank and the International Energy Agency. – Publishing and Knowledge Division, The World Bank, (1818 H Street NW, Washington, USA), 2017. – 44 p.
17. The World Bank. World Development Indicators [Електронний ресурс]. <http://wdi.worldbank.org/tables>
18. The World Energy Issues Monitor 2017. – London: World Energy Council, 2017. – 156 p.

19. World Energy Council. Energy Trilemma Index [Електронний ресурс]. <https://trilemma.worldenergy.org>
20. World Energy Council. Full report: Energy efficiency – a straight path towards energy sustainability [Text].
21. World Energy Forum. Global Energy Architecture Performance Index Report 2017 [Text]
22. World Energy Trilemma: Time to get real – the agenda for change [Electronic resource] / World Energy Council. – Mode of access: <http://www.worldenergy.org>. – Date of access: 02.12.2014.
23. https://news.rambler.ru/economics/37005093/?utm_content=rnews&utm_medium=read_more&utm_source=copylink

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

V. Tarhonskyi, Msc. ORCID 0000-0003-3801-8284

**National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”
SUSTAINABLE DEVELOPMENT OF UKRAINE'S ENERGY IN THE WORLD MEASURES**

In the article are considered the features of the sustainable development of the world power industry, the characteristics of the "Sustainable Energy for All" initiative (SEforAll) are given. An estimation of the influence of development of the energy industry on the sustainable development of the economy as a whole and on climate change under the provisions of the Paris Climate Agreement is given. To assess the directions of Ukraine's energy development in the twenty-first century. European benchmarks are presented. The state of fulfillment of the requirements of sustainable development in the Ukrainian fuel and energy sector in accordance with the purpose of sustainable development No. 7 and the main tasks of the national policy documents is analyzed in detail.

To analyze the prospects for the development of the national fuel and energy sector, the indicators of energy trilemma (energy security, energy equality, environmental sustainability), proposed by CEE, for Ukraine and individual countries of the world have been analyzed. According to the data of the World Bank Enerdata Yearbook, in particular, the dynamics of changes in energy intensity, consumption and energy production in 1990-2016, as well as according to World Development Indicators 2016 in Ukraine, the comparison of the indicators of Ukraine and individual countries was carried out for the complex characterization of the separate sectors of the fuel and energy complex of Ukraine. The status of Ukraine according to the results of 2016 has been characterized according to the World Economic Forum according to the Global Energy Architecture Performance Index by indicators such as economic growth and development, environmental sustainability, energy access and security.

Keywords: Sustainable Development, Energetics for All, Energy Trilemma, Energy Consumption, Consumption and Energy Production, Enerdata Yearbook, Global Energy Architecture Performance Index.

References

1. R. Dawood . Sustainable energy is the "golden thread" – the UN Secretary General //17 September 2015. – www.un.org/russian/news/story.asp?NewsID=24454.
2. S. Denysiuk. Policy formation increase energy efficiency – current challenges guidelines and European// Power engineering: economics, technique, ecology. – 2013. – №2. – p. 7–22.
3. Enerhoefektyvnist ta vidnovliuvani dzherela enerhii / Pid zah. red. A.K. Shydlovskoho; Avt.: Bezv S.M., Bondarenko B.I., Denysiuk S.P. ta insh. – K.: Ukrainski entsyklopedychni znannia, 2007. – 500 c.
4. T.Zorina. Steady development of energy : essence and methodical going near an estimation // Modern technologies of management. ISSN 2226-9339. – №1 (49). № : 4905. Publication data: 2015-01-08. Access mode: <http://sovman.ru/article/4905/>
5. World Energy Council 2013. – Access mode: http://www.worldenergy.org/wp-content/uploads/2014/04/WEC_16_page_document_21_3_14_RU_FINAL.pdf. – Acces data: 04.12.2014.
6. Forsait ta pobudova stratehii sotsialno-ekonomichnoho rozvytku Ukrainy na serednostrokovomu (do 2020 roku) i dovhostrokovomu (do 2030 roku) chasovykh horizontakh / nauk. kerivnyk proektu akad. NAN Ukrainy M.Zghurovskyi. – K.: NTUU «KPI imeni Ihoria Sikorskoho», Vyd-vo «Politekhnika», 2016. – p. 184 .
7. Tsili Rozvytku Tysiacholittia Ukraina: 2000–2015. Natsionalna dopovid. – K.: Proekt «Pryskorennia prohresu u dosiahnenni Tsilei Rozvytku Tysiacholittia v Ukraini», 2015. – p.124 .
8. Sustainable Development Goals: National report. – K.: Ministry of Economic Development and Trade of Ukraine, 2017. – p.174 .
9. Power engineering and Sustainable development [Electronic resource] // IAEA Bulletin 54-1-March 2013. – Access mode: http://www.iaea.org/Publications/Magazines/Bulletin/Bull541/Russian/Bull54_1_Mar2013_ru.pdf. – Acces data: 27.10.2014.
10. Action Plan for Energy Efficiency: Realising the Potential. COM (2006) 545 final / Commission of the European Communities, Brussels, 19.10.2006. – 25 p.
11. An Energy Policy for Europe: Communication from the Commission to the European Council and the European Parliament: Doc. COM (2007) 1 final, Brussels, 10.01.2007 [Electronic resource] // EUR-Lex. Access

to European Union law. – Mode of access: <http://eur-lex.europa.eu/smartapi/cgi / sga_doc?smartapi!celexplus!prod!DocNumber&lg =en&type_doc= COMfinal &an _doc=2007&nu _doc=1>.

12. Climate Science Special Report. Fourth National Climate Assessment. Volume I. – U.S. Global Change Research Program, 2017. – 477 p.

13. Denysiuk S. Green Industrial Development in Ukraine / S. Denysiuk, L. Galperina // Industrial Policy and Sustainable Growth. Editors: Murat Yülek. – Springer. – 26 p. ISBN: 978-981-10-3964-5 (Print), 978-981-10-3964-5 (Online).

14. Enerdata. Yearbook 2016 [Electronic resource]. <https://yearbook.enerdata.net>

15. Energy 2020. A strategy for competitive, sustainable and secure energy: Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions: Doc. COM (2010) 639 final. Brussels, 10.11.2010 [Electronic resource] // EUR-Lex. Access to European Union law. – Mode of access: <<http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2010:0639:FIN:EN:PDF>>.

16. Sustainable Energy For All Global Tracking Framework. Progress toward Sustainable Energy 2017. – The World Bank and the International Energy Agency. – Publishing and Knowledge Division, The World Bank, (1818 H Street NW, Washington, USA), 2017. – 44 p.

17. The World Bank. World Development Indicators [Електронний ресурс]. <http://wdi.worldbank.org/tables>

18. The World Energy Issues Monitor 2017. – London: World Energy Council, 2017. – 156 p.

19. World Energy Council. Energy Trillema Index [Електронний ресурс]. <https://trilemma.worldenergy.org>

20. World Energy Council. Full report: Energy efficiency – a straight path towards energy sustainability [Text].

21. World Energy Forum. Global Energy Architecture Performance Index Report 2017 [Text]

22. World Energy Trilemma: Time to get real – the agenda for change [Electronic resource] / World Energy Council. – Mode of access: <http://www.worldenergy.org>. – Date of access: 02.12.2014.

23. https://news.rambler.ru/economics/37005093/?utm_content=rnews&utm_medium=read_more&utm_source=copylink

Надійшла 13.12.2017

Received 13.12.2017

ЛІБЕРАЛІЗОВАНІ РИНКИ ЕНЕРГІЇ LIBERALIZED ENERGY MARKET

УДК 621.316

Г.А. Іванов, начальник департаменту гарантованого покупця
Державне підприємство «Енергоринок» Кабінету Міністрів України

ОСОБЛИВОСТІ МОДЕЛЮВАННЯ ЛІБЕРАЛІЗОВАНОГО РОЗДРІБНОГО РИНКУ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ УКРАЇНИ

У статті наведені складові тарифів та цін у учасників діючого в Україні оптового ринку електричної енергії, а також складові тарифів і цін у учасників лібералізованого ринку електричної енергії. Надані рекомендації щодо допущень при моделюванні роздрібного ринку. За результатами попередньо проведеного моделювання, наведені графічні матеріали з зазначенням можливої частки кожної із складових кінцевої ціни у споживача. Представлений математичні формули, які були використані при моделюванні ціноутворення на роздрібному ринку.

Ключові слова: моделювання, ринок електричної енергії, роздрібний ринок електричної енергії, лібералізація, тарифоутворення.

Внутрішній ринок електроенергії, який поступово впроваджується у Європейському Співтоваристві, має мету надати реальну можливість вибору усім споживачам Європейського Союзу та створити нові можливості для розвитку бізнесу та збільшення транскордонної торгівлі задля досягнення підвищення ефективності, конкурентних цін, покращення якості обслуговування, а також для сприяння безпеці постачання і стабільності. Основна мета впровадження лібералізованого ринку електричної енергії в Україні – економічно-обґрунтовані ціни, надійне постачання з високими параметрами якості та рентабельність суб'єктів ринку. Саме ціни для споживачів є головними індикаторами «ефекту» від впровадження нової моделі ринку електричної енергії. Ці ціни най-більш важливі при прийнятті регуляторних та управлінських рішень щодо захисту інтересів споживачів електричної енергії України. Тому, для оцінки можливих наслідків від запроваджених реформ в електроенергетиці, вкрай важливим є моделювання процесів ціноутворення на роздрібному ринку, де можливе визначення рівня цін для промислових споживачів та населення. Розуміння того, що будь-які помилки в регулюванні на ринку електричної енергії будуть оплачені саме споживачем, обумовлює необхідність моделювання всіх процесів тарифо- та ціноутворення, які впливають на роздрібні ціни для споживачів.

В Україні наразі діє єдиний оптовий ринок електричної енергії. На цьому ринку всі виробники електричної енергії продають єдиному покупцю а енергопостачальники купують у єдиного покупця всю електричну енергію для подальшого постачання споживачам та для експорту. Вся електрична енергія на оптовому ринку купується по єдиній ціні – оптова ринкова ціна, яка формується оптовим постачальником за правилами ринку електричної енергії, затверджених національною комісією, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг (далі – Регулятор). Ціна електричної енергії для всіх енергопостачальників в ОРЕ є однаковою та погодинною, незалежно від того, якому споживачу вона постачається. Оптова ринкова ціна, крім середньозваженої ціни купівлі електричної енергії у виробників, включає в себе і ціни послуг та надбавок, зокрема на рисунку 1 наведена структура оптової ринкової ціни з урахуванням частки кожної з них.

В оптову ціну електричної енергії включаються послуги з передачі електричної енергії магістральними та міждержавними мережами (тариф на передачу, з урахуванням послуг диспетчерського (оперативно-технологічного) управління, акцизний податок, дотаційні сертифікати та інше (зокрема кошторис оператора оптового ринку).

Енергопостачальники поділяються на дві групи: постачальники за регульованим тарифом (далі – ПРТ) та постачальники за не регульованим тарифом (далі – ПНТ). ПРТ здійснює господарську діяльність з постачання електричної енергії на закріпленій території, тариф якого регулюється НКРЕКП та встановлюється для двох груп споживачів: для споживачів 1 групи – усі споживачі, крім побутових; для споживачів 2 групи – побутові споживачі. ПРТ здійснює постачання електричної енергії непобутовим та побутовим споживачам за тарифами, що регулюються НКРЕКП. ПНТ здійснює постачання електричної енергії не побутовим споживачам.

Структура тарифу ПРТ на постачання електричної енергії споживачам України наведена на рисунку 2.

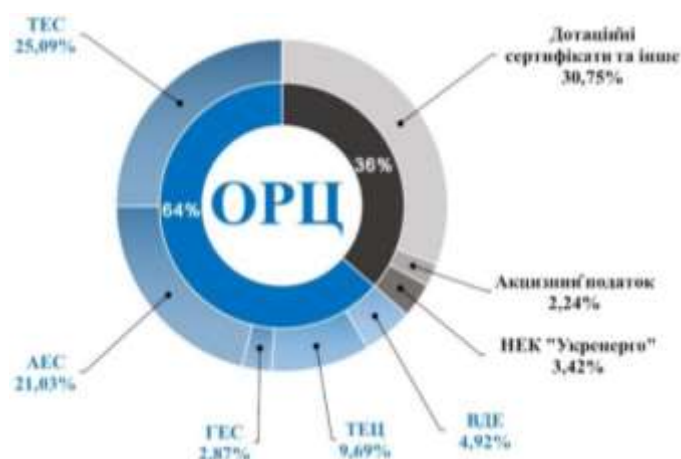


Рисунок 1 – Структура оптової ринкової ціни електричної енергії.



Рисунок 2 – Структура тарифу ПРТ з постачання електричної енергії споживачам України.

Як правило, діяльність ПРТ здійснює підприємство, яке також здійснює діяльність з розподілу електричної енергії - транспортування електричної енергії місцевими (локальними) електричними мережами. Тарифи на діяльність з розподілу електричної енергії також встановлюються Регулятором для кожного підприємства окремо. На Рисунку 3. наведена структура середньозваженого тарифу з розподілу електричної енергії. Найбільшу частку в структурі тарифу на розподіл займає фонд заробітної плати, а інші складові є джерелом покриття витрат на підтримання функціональності розподільчих мереж та їх розвитку. Слід зазначити, що в тарифі на розподіл включені додаткові кошти на фінансування інвестиційної програми розвитку розпо-дільчої мережі.



Рисунок 3 – Структура середньозваженого тарифу з розподілу електричної енергії.

Таким чином, в діючій моделі ринку всі ціни та тарифи ПРТ та споживачів, як на оптовому так і на роздробному ринку, встановлюються з боку держави. Тарифи на передачу, розподіл та постачання не включають в себе джерела на купівлю електричної енергії. Роздрібні тарифи у споживача є джерелом коштів для тарифів на розподіл та постачання, а також для купівлі електричної енергії в ОРЕ з урахуваннями втрат в мережах.

Ціна в договорах між ПНТ та споживачем є предметом домовленості та не регулюється з боку Регулятора. При цьому, ПНТ, як і ПРТ, купує всю електричну енергію для свої споживачів в ОРЕ, укладає договори з електророзподільним підприємством на передачу електричної енергії розподільчими мережами за тарифом встановленим Регулятором. Держава, опікуючись над правами споживачів, а саме для гарантування безперервності постачання електричної енергії, зобов'язує ПРТ та споживача мати укладений договір на постачання, не залежно від того здійснюється купівля-продаж електричної енергії між споживачем та ПНТ. Це обумовлено тим, що ПНТ з будь яких причин може зупинити постачання за договором (наприклад через банкрутство), а ПРТ автоматично починає здійснювати постачання за раніш укладеним договором та встановленим Регулятором тарифом.

Всі кошти за спожиту електричну енергію споживачі, яким постачання електричної енергії здійснює ПРТ, перераховують на банківські рахунки зі спеціальним режимом використання. В нормальних умовах, ці кошти автоматично перераховуються на поточний рахунок ПРТ, який використовує їх для розрахунків з оптовим постачальником електричної енергії. Звісно, частина коштів отриманих від споживача ПРТ залишає в себе для наповнення тарифів з розподілу та постачання. Якщо ПРТ не в повному обсязі розраховується з ОРЕ, Регулятор застосовує алгоритм перерахування коштів на поточному рахунку зі спеціальним режимом використання. Як приклад, Регулятор може встановити, що 80 % коштів споживачів направляються автоматично на поточний рахунок зі спеціальним режимом використання оптового постачальника, а 20 % на поточний рахунок ПРТ. Таким чином забезпечуються розрахунки оптового постачальника з виробниками за закуплену електричну енергію. ПНТ здійснює купівлю електричної енергії в ОРЕ тільки за передплатою. Оптовий постачальник постійно контролює наявність коштів на рахунку ПНТ, і у разі їх відсутності автоматично враховує обсяги споживання споживачем ПНТ до корисного відпуску електричної енергії відповідного ПРТ. Алгоритм руху коштів між споживачем та ПНТ встановлюється договором між ними та не регулюється з боку КНРЕКП.

Загальні підходи до моделювання роздрібного ринку після запровадження ринку двосторонніх договорів та балансууючому ринку електричної енергії в Україні.

Європейським законодавством встановлена норма, яка забороняє оператору системи розподілу здійснювати інші види господарської діяльності на ринку електричної енергії, не пов'язані з розподілом [1]. Це означає, що електророзподільні підприємства (наразі це облэнерго) повинні юридично відокремити діяльність з постачання електричної енергії. Постачання електричної енергії можуть здійснювати тільки електропостачальники або споживачі для власних потреб. Постачання електричної енергії здійснюється за нерегульованими ринковими цінами. Договір постачання електричної енергії укладається між електропостачальником та споживачем і передбачає розрахунки за фактично спожиту електричну енергію. При цьому електропостачальники на конкурентних засадах, або за рішенням Кабінету Міністрів України, можуть отримати можливість здійснювати функції постачальника універсальних послуг або функції

постачальника “останньої надії”. У випадку покладення на електропостачальника зобов’язань з надання універсальних послуг або виконання функцій постачальника “останньої надії”, постачання електричної енергії споживачам здійснюються за регульованими цінами. Постачальник універсальних послуг не має право відмовити споживачу у поставках електричної енергії та за рішенням Кабінету Міністрів України має постачати за встановленими Регулятором тарифами виключно побутовим та малим непобутовим споживачам. Крім того, постачальник універсальних послуг повинен купувати за “зеленим” тарифом електричну енергію, вироблену з енергії сонячного випромінювання та/або енергії вітру генеруючими установками приватних домогосподарств. Постачальник універсальних послуг виконує свою діяльність на закріпленій території та на якій діяльність іншого постачальника універсальних послуг забороняється. Постачальник “останньої надії” також здійснює свою діяльність на закріпленій території, але виконання своїх функцій він починає у таких випадках: банкрутство, ліквідація попереднього електропостачальника, необрання споживачем електропостачальника, зокрема – після розірвання договору з попереднім електропостачальником та інше. Постачальник “останньої надії” автоматично здійснює постачання з моменту припинення постачання надії” постачає електричну енергію споживачу протягом строку, який не може перевищувати дев’яносто днів.

Законодавством не встановлюються вимоги щодо принципів тарифоутворення при здійсненні діяльності з розподілу та не встановлюється кількість ставок для тарифів оператора системи розподілу. При моделюванні роздрібного ринку необхідно розраховувати тарифи для кожного оператора системи передачі окремо та мати можливість враховувати в ціні споживача плату за приєднану потужність. Моделювання цін у споживачів на роздрібному ринку необхідно здійснювати для кожної закріпленої території операторів системи розподілу. На першому етапі, як припущення, необхідно розраховувати з прив’язкою до закріплених територій здійснення господарської діяльності з розподілу електричної енергії (території постачання електричної енергії обленерго). Як припущення, слід вважати, що вся електрична енергія постачається постачальником універсальних послуг. Тоді ціни та тарифи з прив’язкою до закріплених територій моделюватимуться більш адекватно у відповідному регіоні України.

При моделюванні необхідно враховувати можливі фактори зміни графіку споживання внаслідок впровадження споживачами або учасниками роздрібного ринку енергоефективних та енергозберігаючих технологій. При цьому слід враховувати той факт, що ціни для споживачів повинні визначатись в кожній годині доби для оцінки можливої міграції обсягів споживання між годинами в рамках доби постачання. Крім того, важливим є визначення цін на електричну енергію у споживачів в розрізі класів напруги приєднання електроустановок та груп.

Перш за все розглянемо ціноутворення на електричну енергію в новій моделі ринку. На ринку електричної енергії п’ять сегментів, на яких учасники ринку мають можливість купувати або продавати електричну енергію. На Рисунку 4. наведений можливий сценарій перерозподілу обсягів електричної енергії між сегментами ринку, яку будуть купувати електропостачальники. Цей сценарій побудований виходячи з загальноєвропейської практики.



Рисунок 4 – Можливий сценарій перерозподілу обсягів електричної енергії між сегментами ринку електричної енергії, яку будуть купувати електропостачальники

В статті не розглядаються механізми моделювання ціноутворення на електричну енергію через те, що вони досить складні та потребують окремого вивчення, але ціна на електричну енергію є суттєвою складовою ціни на постачання електричної енергії споживачу. Моделювання ціноутворення на ринку «на добу наперед» та на балансуєчому ринку висвітлено, наприклад, в [2].

У порівнянні із структурою діючого тарифу ДП “НЕК “Укренерго”, до експлуатаційних витрат додаються витрати на купівлю електричної енергії з метою компенсації технологічних витрат в мережах та, відповідно, витрати оператора системи передачі на балансуєчому ринку. Крім того, у оператора системи передачі є зобов’язання укласти договір з гарантованим покупцем щодо надання компенсаційного платежу для покриття витрат при здійсненні діяльності купівлі-продажу електричної енергії за “зеленим” тарифом та здійснення функцій сторони відповідальної за баланс балансуєчої групи виробників за “зеленим” тарифом. При моделюванні складових цін на роздрібному ринку необхідно враховувати вищенаведені складові тарифу оператора системи передачі. При цьому на першому етапі не враховувати складову тарифу на покриття витрат при здійсненні функцій з надання послуг комерційного обліку, але в подальшому передбачити можливість встановлення вартості цих послуг.

Складова послуг з диспетчеризації приймається на рівні 5 % від діючого тарифу на передачу електричної енергії магістральними та міждержавними мережами (цей тариф наразі включає в себе витрати на диспетчеризацію). Складова вартості вирішення системних обмежень розраховується виходячи з витрат, які виникають у оператора системи передачі при усуненні системних обмежень. До тарифу з диспетчерського (оперативно-технологічне) управління оператора системи передачі включається різниця між витратами оператора системи передачі на купівлю пропозицій учасників балансування з ознакою “роботи за вимогою” на балансуєчо-му ринку по заявленій ціні та продажу електричної енергії учасникам балансування по заявленій ціні в пропозиціях для збереження балансу попиту та пропозицій. Складова тарифу вартості допоміжних послуг на першому етапі встановлюється на рівні вартості умовно постійних витрат ТЕС в діючому оптовому ринку електричної енергії. В тарифі на диспетчерське (оперативно-технологічне) управління не враховуються витрати на виконання функцій адміністратора розрахунків та адміністратора комерційного обліку через невизначеність рівня вартості надання цих послуг, але необхідно передбачити при моделюванні можливість врахування таких витрат в тарифі диспетчерське (оперативно-технологічне) управління.

В тарифі оператора системи розподілу найбільшу частку займає складова покриття витрат при наданні послуг з передачі електричної енергії, яка встановлюється на рівні діючого тарифу на передачу місцевими (розподільчими) мережами. Друга за обсягом складова – це покриття витрат оператора системи розподілу на купівлю електричної енергії з метою компенсації витрат в розподільчих мережах, відповідно, третя складова на покриття витрат оператора системи розподілу, які він поніс виконуючи функцію сторони відповідальної за баланс. При моделюванні на першому етапі, в тарифі на розподіл не враховується складова для покриття витрат при здійсненні функцій з надання послуг комерційного обліку, але повинна бути можливість її встановлення.

Тариф на послугу з постачання електричної представлений двома складовими – це діючий середньозважений тариф ПРТ та складова з покриття витрат електропостачальника на балансуєчому ринку. Моделювати необхідно два тарифи з постачання – для першої та другої групи споживачів (для не побутових та побутових споживачів) та для кожного з діючих ПРТ в Україні.

На рисунку 5 представлена структура середньозваженої ціни постачання електричної енергії споживачу.

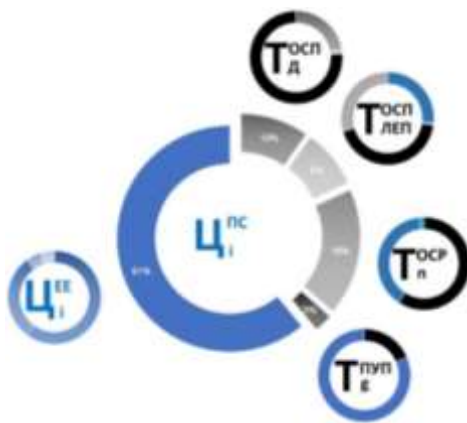


Рисунок 5 – Структура середньозваженої ціни постачання електричної енергії споживачу.

Роздрібна ціна електричної енергії для споживачів розраховується за наступною формулою, коп./кВт·год:

$$Ц_i^{пс} = Ц_i^{ее} + T_{г}^{пуп} + T_{п}^{осп} + T_{д}^{осп} + T_{лєп}^{осп}$$

де:

g – група споживачів (1 – промисловість, 2 – населення);

n – клас напруги мереж, до яких підключені електроустановки споживача (1 або 2 клас);
 i – година доби;

Π_i^{EE} – ціна електричної енергії на ринку, коп./кВт·год;

$T_g^{ПУП}$ – тариф на постачання електричної енергії постачальниками універсальних послуг, коп./кВт·год;

$T_n^{ОСП}$ – тариф на розподіл електричної енергії, коп./кВт·год;

$T_d^{ОСП}$ – тариф на диспетчеризацію оператора системи передачі, коп./кВт·год;

$T_{ЛЕП}^{ОСП}$ – тариф на передачу магістральними та міждержавними мережами оператора системи передачі, коп./кВт·год.

Тариф на передачу магістральними та міждержавними мережами ОСП розраховується за наступною формулою, коп./кВт·год:

$$T_{ЛЕП}^{ОСП} = \frac{D^{НЕК} \times 0,95 + D_B^{ОСП} + D_{НВ}^{ОСП} + D_{ГП}^{КП}}{W_{\Sigma i}^{КВУ} \times 100}$$

де:

$D^{НЕК}$ – реалізація (товарний відпуск у структурі тарифу НЕК “Укренерго”, тис.грн.) у структурі тарифу на передачу електричної енергії магістральними та міждержавними електричними мережами ДП «НЕК «Укренерго», тис.грн.;

0,95 – частка використання грошей, отриманих НЕК “Укренерго” з тарифу на передачу, для здійснення діяльності на передачу магістральними та міждержавними мережами, у.о.;

$D_B^{ОСП}$ – вартість купленої на РДН електричної енергії з метою компенсації технологічних втрат електричної енергії при її передачі, тис.грн.;

$D_{НВ}^{ОСП}$ – вартість небалансів втрат електричної енергії при її передачі, тис.грн.;

$D_{ГП}^{КП}$ – величина грошових коштів, які включені до тарифу ОСП для компенсації витрат гарантованого покупця, тис.грн.;

$W_{\Sigma i}^{КВУ}$ – обсяг корисного відпуску електричної енергії всім споживачам України, тис.кВт·год.

Тариф ОСП на диспетчеризацію розраховується за наступною формулою, коп./кВт·год:

$$T_d^{ОСП} = \frac{D^{НЕК} \times 0,05 + D_{ДСО}^{ОСП} + D_{ДДП}^{ОСП}}{W_{ОЕС}^{ФАКТ} \times 100}$$

де:

0,05 – частка використання грошей, отриманих НЕК “Укренерго” з тарифу на передачу, для здійснення диспетчеризації в ОЕС України, у.о.;

$D_{ДСО}^{ОСП}$ – обсяг грошових коштів, необхідних ОСП для покриття витрат понесених ним на балансуєчому ринку в наслідок вирішення системних обмежень (різниця між витраченими коштами ОСП на завантаження блоків ТЕС для усунення системних обмежень та отриманих коштів від розвантаження блоків ТЕС для усунення системних обмежень), у.о.;

$D_{ДДП}^{ОСП}$ – обсяг грошових коштів необхідних ОСП для покриття витрат, понесених ним на ринку допоміжних послуг для закупівлі резервів потужності в ОЕС України (прийнятий на рівні, необхідному для покриття умовно постійних витрат виробників на ТЕС та обсягу грошових коштів для закупівлі допоміжних послуг у виробників електричної енергії на ТЕС – пропорційний обсягу відпуску електричної енергії на ТЕС до величини умовно-постійних витрат ТЕС), тис.грн.

Моделлю передбачається, що вирішення системних обмежень здійснюється на балансуєчому ринку, витрати оператора системи передачі внаслідок вирішення цих обмежень, покриваються з тарифу на диспетчеризацію. Наразі не визначено на якому саме сегменті будуть вирішуватися системні обмеження – на РДН або БР, але в кожному варіанті є свою переваги та недоліки, як це зазначено в [3].

Тариф на розподіл мережами n - класу напруги розраховується за наступною формулою, коп./кВт·год:

$$T_n^{ОСП} = \frac{D_n^{ОСП} + D_{nB}^{ОСП} + D_{nНВ}^{ОСП}}{W_{\Sigma i}^n \times 100}$$

де:

D_n^{OCB} – реалізація (товарний відпуск у структурі тарифу на розподіл відповідного обленерго), тис.грн.;

D_{nB}^{OCB} – вартість купленої на РДН електричної енергії з метою компенсації технологічних втрат електричної енергії при її розподілу, тис.грн.;

D_{nHB}^{OCB} – вартість небалансів втрат електричної енергії при її розподілі, тис.грн.;

$W_{\sum i}^n$ – обсяг передачі електричної енергії мережами класу n, тис.кВт·год.

Тариф з постачання електричної енергії споживачам розраховується за наступною формулою, коп./кВт·год:

$$T_g^{ПУП} = \frac{D_g^{ПРТ} + D_{gBP}^{ПРТ}}{W_{\sum i}^{ПУП}} \times 100$$

де: $D_g^{ПРТ}$ – реалізація (товарний відпуск у структурі тарифу на постачання відповідного ПРТ), тис.грн.;

$D_{gBP}^{ПРТ}$ – витрати ПУП на балансуєчому ринку при врегулюванні небалансів електричної енергії в якості сторони відповідальної за баланс, тис.грн.;

$W_{\sum i}^{ПУП}$ – обсяг корисного відпуску електричної енергії відповідного ПРТ, тис.кВт·год.

Висновок. Таким чином, запропонована в статті модель дозволяє здійснювати розрахунки складових роздрібної ціни у споживачів електричної енергії, на підставі яких можливо оцінити наслідки від прийняття тих чи інших регуляторних або управлінських рішень. Це, в свою чергу, підвищує ефективність впровадження реформ, які пов'язані з лібералізацією ринку електричної енергії України.

Список використаної літератури

1. Directive 2009/72/EC of the European Parliament and of the Council concerning common rules for the internal market in electricity and repealing Directive 2003/54/EC. Article 9 “Unbundling of transmission systems and transmission system operators”. Available at: <http://extwprlegs1.fao.org/docs/pdf/eur124471.pdf>.

2. Блінов І.В., Парус Є.В., Іванов Г.А. Комплексна розрахункова модель ринку на добу наперед та балансуєчому ринку електроенергії України // Промелектро. – 2016. – № 4-5. – С. 8 – 12.

3. Блінов І.В. Теоретичні та практичні засади функціонування конкурентного ринку електроенергії // Наукова думка – 2015. С. 150 – 155.

H. Ivanov, Head of Guaranteed Buyer's Department

National enterprise «Enerhorynok» of the Cabinet of Ministers of Ukraine

DETERMINATION OF REQUIREMENTS FOR MODELING OF THE LIBERALIZED RETAIL ELECTRICITY MARKET OF UKRAINE

The article presents the components of tariffs and prices for participants of the wholesale electricity market of Ukraine. The components of tariffs and prices for participants in a liberalized electricity market are presented. Recommendations for possible assumptions in the modeling of the retail market are given. Based on the results of the preliminary simulation, graphical materials that indicating the possible shares of components in the final price of the consumer are given. Mathematical equations are given. They used in pricing modeling of the retail market.

Keywords: modelling, electricity market, retail electricity market, liberalization, pricing.

References

1. Directive 2009/72/EC of the European Parliament and of the Council concerning common rules for the internal market in electricity and repealing Directive 2003/54/EC. Article 9 “Unbundling of transmission systems and transmission system operators”. Available at: <http://extwprlegs1.fao.org/docs/pdf/eur124471.pdf>.

2. Blinov I.V., Parus Ye.V., Ivanov H.A. Integrated design model for day ahead and balancing market of Ukraine // Promelektro. – 2016. – № 4-5. – P. 8 – 12.

Г.А. Иванов, Начальник департамента гарантированного покупателя
Государственное предприятие «Энергорынок» Кабинета Министров Украины

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТРЕБОВАНИЙ К МОДЕЛИРОВАНИЮ ЛИБЕРАЛИЗОВАННОГО РОЗНИЧНОГО РЫНКА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ УКРАИНЫ

В статье приведены составляющие тарифов и цен у участников действующего в Украине оптового рынка электрической энергии. Приведены составляющие тарифов и цен у участников в либерализованном рынке электрической энергии. Даны рекомендации по возможным допущениям при моделировании розничного рынка. По результатам предварительно-проведенного моделирования, приведены графические материалы с указанием возможных долей составляющих в конечной цене потребителя. Приведены математические формулы, которые использованы в моделировании ценообразования на розничном рынке.

Ключевые слова: моделирование, рынок электроэнергии, розничный рынок электроэнергии, либерализация, тарифообразование.

Надійшла 10.04.2017
Received 10.04.2017

УДК 621.316

І.В. Блінов, канд. техн. наук, старш. наук. співроб.
Інститут електродинаміки НАН України
С.Є. Танкевич, канд. техн. наук, старш. наук. співроб.
Інститут електродинаміки НАН України

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

ПІДХОДИ ДО ОБ'ЄДНАННЯ УЧАСНИКІВ КОНКУРЕНТНОГО РИНКУ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

Широке розповсюдження розосереджених джерел енергії та розвиток конкурентних відносин в енергетиці спонукають до пошуку нових перспективних рішень щодо керування та балансування в енергетичних системах. Такими рішеннями стають віртуальні електричні станції (ViES) та балансуєчі групи (БГ). В статті викладено результати аналізу світового досвіду створення та використання ViES та балансуєчих груп. Розглянуто основне призначення та складові ViES, а також аспекти їх функціонування в залежності від призначення. Наведено основні функції БГ та проблеми, що вони дозволяють вирішувати.

Ключові слова: Smart Grid, віртуальна електрична станція, балансуєча група, балансування електроенергії, керування в енергетиці.

Вступ. Лібералізація ринку, перспектива розповсюдження розосереджених джерел енергії (РДЕ), зокрема і відновлюваних джерел енергії (ВДЕ), розвиток інформаційних технологій, а також перспектива об'єднання із європейською енергетичною системою потребує пошуку нових ефективних рішень в електроенергетиці України, зокрема щодо підвищення керованості та балансування електроенергії, як важливої та обов'язкової умови функціонування будь якого енергооб'єднання.

Для вирішення технічних і економічних питань, що пов'язані із інтегруванням РДЕ в електроенергетичну систему (ЕЕС), залученням РДЕ до участі в ринку електроенергії (РЕ), потребою врахування «переривчастого» характеру значень потужності ВДЕ та балансування електроенергії в провідних країнах світу запроваджені механізми об'єднання учасників РЕ. Мова йде про віртуальні електричні станції (ViEC) та балансуєчі групи (БГ). Проте, на сьогодні, в Україні немає єдиного бачення щодо використання цих підходів до об'єднання учасників конкурентного РЕ та відсутні практичні засади їх створення та функціонування, не зважаючи на те, що нова законодавча база передбачає можливість формування таких об'єднань учасників ринку.

Віртуальна електростанція – це система, що зазвичай складається з, зазвичай, розосереджених виробників електроенергії, споживачів і систем акумуляування енергії і об'єднана спільним керуванням ними. ViEC дозволяє підвищити ринкову вагу об'єктів малої розподіленої генерації до крупних генеруючих об'єктів. Крім того, ViEC дозволяють вирішувати зворотню задачу, тобто проблему домінування великих компаній на РЕ без юридичного розподілу їх активів.

Балансуєча група – це віртуальне об'єднання учасників ринку електроенергії створене з метою обліку та балансування електроенергії всередині групи. Тобто, БГ це засіб уникнення дисбалансу між прогнозованими та фактичними обсягами вироблення та споживання електроенергії, окремими учасниками такої групи. В чинному законодавстві України існує поняття балансуєчої групи, але на сьогодні немає правил ринку, що б встановлювали процес їх створення та роботи, а також існує ряд технічних, комерційних та економічних особливостей, а також регуляторних обмежень, що перешкоджають введенню балансуєчих груп в Україні.

Таким чином, ViEC та БГ є ефективними підходами об'єднання учасників РЕ в умовах конкурентного ринку і спрямовані, в цілому, на стабілізацію та підвищення стійкості та ефективності роботи енергосистем та їх об'єднань.

Метою статті є аналіз підходів до об'єднання учасників конкурентного ринку електроенергії в електроенергетичних системах, що призначені для підвищення ефективності балансування та розподілу електроенергії в енергосистемах з урахуванням світового досвіду.

Віртуальні електростанції.

Віртуальні електростанції на сьогодні отримують все більший розвиток в енергосистемах західних країн, зацікавлених в більш ефективному використанні енергоресурсів. На сьогодні перелік цих країн очолює Німеччина, яка докладає значних зусиль для розробки складних систем керування енергетикою. Наприклад, енергетичний гігант RWE за допомогою програмного забезпечення керує постачанням і споживанням енергії, виробленої електростанціями Рейнсько-Рурського регіону, найбільш густонаселеного в Німеччині. Використовуючи систему керування, розроблену компанією Siemens, у RWE знайшли спосіб пов'язати в єдину мережу десятки дрібних ВДЕ разом із традиційними електростанціями. У лютому 2012 року RWE вперше запустила в промислову експлуатацію ViEC. Віртуальна електростанція генерує близько 80 МВт потужності, які компанія продає на біржі EEX у Лейпцигу.

У Великобританії компанією Reactive Technologies розроблено свою технологію, що дозволяє створювати ViEC.

Фінська енергокомпанія Fortum Corporation нещодавно запустила пілотний проект: для підтримки балансу в енергосистемі об'єднала 70 приватних домогосподарств, які отримують тепло і гарячу воду від водогрійних котлів, в єдину мережу. Сумарна потужність котлів всього 100 кВт, але це перший приклад у Фінляндії використання потужності саме побутових споживачів для регулювання навантаження енергосистеми.

Інший приклад ViEC – проект канадської компанії New Brunswick Power, яка залучила до нього 1400 будинків і 30 компаній. Для балансування генерування від ВДЕ, енергокомпанія використовує систему керування споживанням, яка користується великими обсягами гнучкою навантаження споживачів (за рахунок регулювання температури повітря, потужності водонагрівачів та іншого побутового обладнання). Ця віртуальна електростанція дозволяє забезпечити додатковий регульовальний ресурс у 17 МВт і дозволяє легше проходити ранкові піки навантаження на енергосистему.

У США енергетичні компанії New York Con Ed, SunPower і Sunverge планують створити віртуальну електростанцію із залученням приватних домогосподарств. Є домовленість із власниками 300 приватних будинків про розміщення на їх дахах сонячних панелей потужністю від 7 до 9 кВт, а також акумуляторів для зберігання енергії. Об'єднані в керовану мережу, сонячні панелі будуть єдиним комплексом, причому енергокомпанії не будуть інвестувати у купівлю ділянок під будівництво електростанції. Натомість

власники будинків-учасників проекту будуть отримувати «зелену» енергію безкоштовно. Також в США є приклад ВіЕС, що засновані на системах керування попитом. Встановивши в 165 приватних будинках інтелектуальні системи зберігання електроенергії, компанія Glasgow Electric Plant Board накопичують енергію в нічний час, або коли попит і ціни на електроенергію низькі. Коли попит і ціни досягають високого рівня, енергокомпанія забезпечує своїх споживачів із сховищ.

Як зазначалося вище, концепція ВіЕС передбачає наявність джерел енергії, споживачів, систем акумулювання енергії й інформаційних технологій керування її складовими. Розглянемо ці складові більш детально.

Генерація ВіЕС може бути умовно поділена на три основні групи. По-перше, це традиційні електростанції на викопному паливі. По-друге, це великі РДЕ в основному на основі відновлюваних джерелах енергії, основна задача яких, надавати вироблену потужність в енергосистему. Також, це РДЕ середньої та низької потужності, що зазвичай обладнані системами накопичення енергії та приєднані до розподільчих мереж середньої, або й низької напруги. По-третє, це невеликі індивідуальні генерувальні установки споживачів для житлових, комерційних або промислових потреб. Надлишок виробництва електроенергії таких ДРГ може бути відданий у мережу так само, як і його нестача може бути компенсована за рахунок мережі.

Споживачі, що входять до складу ВіЕС можуть бути як промисловими, так і побутовими.

Сьогодні основне призначення систем накопичення енергії це – забезпечувати більш рівномірний графік видачі потужності в мережу від ВДЕ, особливо, сонячних або вітрових електростанцій, оскільки вони мають мінливий графік генерування потужності. Наразі, крім традиційних акумуляторних батарей різного типу, також використовуються і розвиваються інші сховища енергії: водноакумулявальні установки (наприклад гідроакумулявальна електростанція); сховища енергії на стисненому повітрі; маховикові технології накопичення енергії; надпровідникові магнітні акумулятори; технології накопичення енергії на основі використання супер конденсаторів; паливні елементи.

Найбільш важливим елементом ВіЕС безумовно є інформаційні технології, які пов'язують всі її елементи. Це квінтесенція з інтелектуальних пристроїв, лічильників, бездротових і кабельних мереж, керуючого комп'ютера, програмних додатків і систем безпеки передавання даних тощо. Ключовим елементом ВіЕС є система керування електростанцією, вона може базуватися, наприклад, на системах енергоменеджменту, SCADA системах або на центрах диспетчерського керування. Така система координує енергетичні та інформаційні потоки, що йдуть від генераторів, навантажень і сховищ. Зв'язок є двонаправленим, тому оператор ВіЕС може не тільки отримувати інформацію про поточний стан кожної складової, а й також надсилати сигнали керування [1]. Для належного функціонування система керування має отримувати інформацію про стан кожної складової та отримувати прогнозні дані, особливо це стосується РДЕ що мають стохастичний характер генерування. Прогнозні дані щодо генерування особливо потрібні для ефективної роботи разом із традиційною генерацією в реальному часі. Інша прогнозна інформація, наприклад щодо можливих збоїв у мережі відіграє важливу роль у процесі оптимізації роботи ВіЕС.

Щодо аспектів побудови ВіЕС, то на сьогодні прийнято виділяти два основних типи ВіЕС: комерційний (продаж електроенергії на оптовий ринок) та/або технічний (допоміжні послуги, зокрема такі, як регулювання частоти та активної потужності тощо). Основними аспектами, що визначають конструкцію ВіЕС, є технологічні можливості, комерційні та економічні можливості і регуляторні обмеження. Крім того, стратегія керування розподільними мережами, властивості доступних блоків РДЕ, пристроїв накопичення енергії та наявності керованих навантажень можуть створювати технічні умови, яким мають відповідати ВіЕС. Тому первинним завданням при проектуванні і розробці ВіЕС є контроль і керування доступними одиницями РДЕ, пристроями накопичення енергії і керованими навантаженнями. Для цього необхідно розробити необхідну комунікаційну інфраструктуру, а також програмні додатки для прогнозування, моніторингу та контролю. Звичайно, можна використовувати доступні засоби та програмне забезпечення, якщо вони відповідають вимогам.

Для моніторингу та керування РДЕ на об'єктах мають бути встановлені інтелектуальні вимірювальні та керуючі пристрої. Ці пристрої здійснюють зв'язок через проміжні пристрої з центром керування. Враховуючи величину ВіЕС, географічний розподіл одиниць РДЕ і доступні їх категорії, необхідно обирати спосіб роботи та керування станцією, централізований або децентралізований. Очевидно, що великі ВіЕС вимагають децентралізованого підходу із наданням функцій прийняття рішень проміжним керуючим елементам відповідно до встановлених алгоритмів. В цьому випадку доречною є розробка мультиагентної системи керування ВіЕС [2].

Щодо комерційних і економічних аспектів ВіЕС, то основною перевагою ВіЕС, як зазначалося, є те, що вона представляє всі контрактні одиниці РДЕ на оптових ринках електроенергії як єдине комерційне підприємство [3]. Для участі у ринку необхідно розробити або використовувати програмні додатки, для прогнозування сумарного генерування ВіЕС. Також, інформація для прогнозів може бути отримана з контракту з власниками РДЕ в поєднанні з прогнозами погоди, історичними та фактичними даними

генерування. Ґрунтуючись на цій інформації, ВиЕС може прогнозувати виробництво енергії і розробляти стратегію участі в оптовому ринку електроенергії.

Нормативно-правові аспекти ВиЕС є індивідуальними для кожної окремої країни.

Балансуючі групи.

Концепція центрального контролю обов'язків зі сторони системного оператора (СО) зарекомендувала себе як придатна і ефективна для балансування системи у вертикально інтегрованих ринках, де відсутня конкуренція між генераторами і споживачами електричної енергії. На конкурентних ринках існує кілька умов, які відрізняються від вертикально інтегрованих підприємств: участь великої кількості продавців і покупців кожного виду продукції, правові вимоги, щодо мінімальних перешкод для споживачів під час вибору постачальника, а також прозорість у всіх сегментах ринку.

Дрібним споживачам і великим виробникам важко брати участь в окремих сегментах ринку, враховуючи складність балансування їх графіків навантаження. Для цього, в деяких європейських країнах використовується підхід консолідації дрібних споживачів і невеликих генераторів у балансуючі групи.

Балансуюча група є основою, на якій працюють більшість лібералізованих енергетичних ринків держав Європи: Австрії, Болгарії, Чехії, Фінляндії, Франції, Німеччини, Угорщини, Італії, Польщі, Румунії, Словенії, Іспанії та Сполученого Королівства, Норвегії, Швейцарії, а також Албанії, Боснії і Герцеговини, Македонії, Чорногорії і Сербії. Національне законодавство цих країн визначає зобов'язання щодо участі в БГ. У деяких країнах участь в балансуючих групах є обов'язковою і кожен учасник ринку (споживач, виробник, постачальник, трейдер) має бути членом БГ, яка зареєстрована в «Області керування». Правилами БГ на врегулювання небалансу відводять від 15 хвилин до 1 години. За недотримання балансу до сторони відповідальної за баланс, зазвичай, застосовують штрафні санкції.

В Угорщині за балансування відповідає СО, він також керує балансуючим ринком. Угорський балансуючий ринок базується на моделі балансуючої групи. Для створення БГ необхідно укласти договір з СО. Згідно з угорським законодавством виробники зобов'язані забезпечувати енергетичний баланс. Час на врегулювання небалансів складає 15 хвилин. Ціни за балансуючу енергію відмінні для кожного періоду часу, і розраховуються на основі обґрунтованих витрат, зокрема по паливній складовій електростанцій. Участь у БГ є обов'язковою для всіх трейдерів електроенергії і реалізується або шляхом укладання угоди із СО, або підписавши зобов'язання балансування зі стороною відповідальною за баланс у певній балансуючій групі. Для того, щоб стати учасниками ринку, всім продавцям необхідно укласти договір з СО або стати учасником балансуючої групи і виконувати свої зобов'язання по балансуванню, як учасника балансуючої групи, перед стороною відповідальною за баланс. Міждержавна торгівля здійснюється лише за умови укладання договору з СО. Сторона відповідальною за баланс надає фінансові гарантії СО для забезпечення розрахунків в рамках договорів.

В Італії СО несе відповідальність за балансування і купує балансуючу енергію на балансуючому ринку, яким керує оператор ринку. Розподіл балансуючої енергії відбувається на основі аукціонів або за попереднім контрактом. Основою балансуючого ринку електроенергії є БГ, що складаються з генераторів малої потужності (<10 МВт) у певній області ринку і споживачів у тій самій області ринку. Час, що надається для врегулювання небалансів становить 1 годину. Існують штрафи за невиконання графіків навантаження. Також для балансування використовують імпортовану енергію.

Відповідно до румунського «Комерційного кодексу» відповідає за балансування СО. Системний оператор також виступає як оператор балансуючого ринку і несе відповідальність за реєстрацію учасників балансуючого ринку; збір та перевірку договорів між учасниками ринку; розрахунок необхідної величини балансуючої потужності для врегулювання небалансів. Балансувальну енергію забезпечують за допомогою аукціонів. Всі виробники зобов'язані брати участь у балансуючому ринку.

За словенським законодавством відповідає за балансування електроенергії СО. Керує балансуючим ринком – оператор ринку. Балансуючий ринок базується на БГ. Для створення БГ необхідно подати заявку оператору ринку і виконати всі необхідні умови. Будь-хто, хто відповідає критеріям, які висунуті оператором ринку, може очолити балансуючу групу. Очільник БГ виконує роль сторони, відповідальної за баланс в межах групи. При цьому виробники не мають ніяких юридичних зобов'язань, щодо забезпечення балансування енергії, за винятком участі блоків потужністю більше 10 МВт, які зобов'язані брати участь у первинному регулюванні частоти. Відповідно до «Правил словенського енергетичного ринку» сторона відповідальна за баланс сплачує штрафи за невиконання графіків навантаження, або отримує нижчу плату за енергію, яку вона постачає понад графіку. Оператор ринку несе відповідальність за розрахунки цих платежів на підставі даних, наданих СО, а також за всі процедури врегулювання в цьому процесі.

Отже, впровадження БГ, насамперед, спрямоване на вирішення таких задач:

- забезпечення балансу в межах балансуючої групи;
- використання балансувальної енергії для покриття різниці між фактичними і передбачуваними обсягами електроенергії в мережі;

- створення системи фінансового врегулювання з питань використання балансуєної енергії та надання аналогічних послуг;
 - покращення інтеграції відновлювальних джерел енергії в енергосистему.
- Зазвичай виділяють такі основні типи БГ на балансуєних ринках ЄС:
- торгові балансуєні групи;
 - балансуєні групи постачальників (головним чином використовуються для забезпечення споживачів);
 - комбіновані балансуєні групи (для торгівлі і забезпечення споживачів).

Отже, очевидно, що керування потужністю і балансування електроенергії має одну і ту саму ціль – балансування генерування й споживання. Проте, керування потужністю – це відхилення від прогнозу в області керування; а балансування енергії – це відхилення від прогнозу в балансуєній групі. Відхилення від прогнозу, попиту чи пропозиції в групі балансування, наприклад, в результаті збою, приводить до зростання балансуєної енергії. «Чиста» балансуєна енергія в усіх БГ в області керування – це потреба в потужності, яку має покрити сторона відповідальна за баланс в області керування. Загальна кількість балансуєної енергії може бути значно більшою, ніж потужність, що потрібна для керування, оскільки БГ можуть компенсувати потреби одна одної. Рахунок за використану балансуєну енергію виставляється балансуєним групам, на основі, кількості енергії, яка була зареєстрована і на основі ціни розрахованої за послуги керування потужністю.

Висновки. В Україні створення балансуєних груп набуває особливої актуальності у зв'язку із прийняттям нового законодавства щодо ринку електроенергії, оскільки їх створення і участь у їх роботі є обов'язковою для всіх учасників РЕ. Таким чином, створено початковий плацдарм для створення і функціонування БГ на ринку електроенергії України, але проаналізувавши досвід країн ЄС, можна сказати, що теперішніх норм і правил недостатньо і вони потребують значного доповнення. Балансуєні групи – це кращий спосіб уникнути збитків і цінової непередбачуваності при торгівлі на балансуєному РЕ. По суті, мова йде про створення «внутрішніх ринків» із різних генеруючих блоків і великих споживачів з метою досягнення «нульового» балансу графіків споживання всередині групи і зниження фінансових втрат від участі у балансуєному ринку. При цьому, чим більше учасників групи, тим буде більший розмір взаємної компенсації відхилень від графіка навантажень і більш низькі ціни за усунення небалансів групи. Отже, функціонування БГ має спрямованість на стабілізацію роботи національних і міждержавних енергосистем.

Щодо впровадження ВіЕС, то досвід провідних країн світу показує, що за допомогою використання ВіЕС можна вирішити як проблему монопольного домінування великих енергокомпаній на ринку, так і проблему підвищення ефективності використання існуючих традиційних електростанцій. Також, впровадження ВіЕС дозволяє підвищити ефективність інтегрування РДЕ в ЕЕС та досягти оптимального балансування системи з вирівнюванням піків споживання, мінімізацією комерційних ризиків виробників та споживачів.

Список використаної літератури

1. Braun M. Virtual Power Plant Functionalities – Demonstrations in a Large Laboratory for Distributed Energy Resources // 20th International Conference on Electricity Distribution (CIRED). – Prague, Czech Republic, 8-11 June 2009.
2. Dimeas A. L., Hatziaargyriou N. D. Agent based control of Virtual Power Plants, Intelligent Systems Applications to Power Systems // ISAP 2007. International Conference on.
3. Денисюк С.П., Горенко Д.С. Аналіз проблем впровадження віртуальних електростанцій // Енергетика: економіка, технології, екологія. – 2016. – № 2. – С. 25-33.

И.В. Блинов, канд. техн. наук, ст. науч. сотр.
Институт электродинамики НАН Украины
С.Е. Танкевич, канд. техн. наук, ст. науч. сотр.
Институт электродинамики НАН Украины

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»
ПОДХОДЫ К ОБЪЕДИНЕНИЮ УЧАСТНИКОВ КОНКУРЕНТНОГО РЫНКА
ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Широкое распространение рассредоточенных источников энергии и развитие конкурентных отношений в энергетике побуждают к поиску новых перспективных решений по управлению и балансированию в энергетических системах. Такими решениями становятся виртуальные электрические станции и балансирующие группы. В статье изложены результаты анализа мирового опыта создания и использования виртуальных электростанций и балансирующих групп. Рассмотрены основное назначение и составляющие таких станций, а также аспекты их функционирования в зависимости от назначения. Приведены основные функции балансирующих групп и проблемы, которые они позволяют решать.

Ключові слова: Smart Grid, виртуальная электростанция, балансирующая группа, энергетический баланс, управления в энергетике.

I. Blinov, Cand. Sc. (Eng.), SRF,
Institute of Electrodynamics National Academy of Science of Ukraine
S. Tankevych, Cand. Sc. (Eng.), SRF,
Institute of Electrodynamics National Academy of Science of Ukraine

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

APPROACHES TO ASSOCIATION OF COMPETITIVE ELECTRICITY MARKET PARTICIPANTS

The widespread use of distributed energy resources and the development of competitive energy market are prompting the search of new promising solutions for management and balancing in power energy systems. Such solutions are the virtual power plants and balancing groups. The article contains the results of the analysis of the world experience in the creation and use of virtual power plants and of balancing groups. The main purpose and components of such power plants, as well as aspects of their functioning depending on the purpose, are considered. The main functions of balancing groups and the problems that they allow to solve are given.

Key words: Smart Grid, virtual power plant, balancing group, energy balance, control in power industry.

References

1. Braun M. Virtual Power Plant Functionalities – Demonstrations in a Large Laboratory for Distributed Energy Resources // 20th International Conference on Electricity Distribution (CIRED). – Prague, Czech Republic, 8-11 June 2009.
2. Dimeas A. L., Hatziaargyriou N. D. Agent based control of Virtual Power Plants, Intelligent Systems Applications to Power Systems // ISAP 2007. International Conference on.
3. Denysiuk S., Horenko D. Analysis problems of implementation virtual power plants // Energy: economics, technology, ecology – 2016. – № 2. – pp. 25-33.

Надійшла 30.05.2017
Received 30.05.2017

В.А. Попов, д-р техн. наук, проф.
П.О. Замковий, аспірант
Д.С. Поплавець, студент
Л.В. Охота, студент

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

ПРОГНОЗУВАННЯ ЦІН НА ЕЛЕКТРИЧНУ ЕНЕРГІЮ З ВИКОРИСТАННЯМ НЕЧІТКИХ ЧАСОВИХ РЯДІВ

Короткострокове прогнозування вартості електричної енергії на оптовому ринку є необхідною умовою для ефективної участі в торгах оператора Microgrid та відповідних підрозділів промислових підприємств. Короткострокове прогнозування ціни має важливе значення для визначення оптимального розподілу потужностей між розосередженими джерелами генерації та їх узгодженої роботи з засобами акумулювання енергії, керованим навантаженням та енергосистемою. В роботі подано стислий опис і наведені основні математичні залежності теорії нечіткого моделювання часових рядів і методики їх прогнозування. Такий підхід передбачає можливість використання як нечіткої (в тому числі лінгвістичної), так і детермінованої (завдяки фазифікації) вихідної інформації. Експериментальні розрахунки показали перспективність застосування нечіткого підходу для вирішення проблеми прогнозування часових рядів (на прикладі вартості електричної енергії), у тому числі у разі відсутності деяких статистичних даних або можливої наявності в них похибки.

Ключові слова: нечіткі часові ряди, Microgrid, короткострокове прогнозування ціни, розосереджена генерація.

В сучасному світі новітні технології, економічні та екологічні стимули змінюють підходи до самих принципів виробництва, передачі та розподілу електроенергії. Великі централізовані електростанції поступаються місцем менш потужним, орієнтованим на активне використання відновлювальної енергії але в більшій мірі розосереджених у межах певної території. Це явище отримало назву розосередженої генерації (РГ).

Поширення РГ в Україні ще не досягло значних рівнів, однак ця ситуація швидко змінюється, і це вимагає приділення збільшеної уваги питанням, що виникають у зв'язку зі збільшенням частки в системі розподілу електроенергії. У той же час, хаотичне застосування РГ може створити достатню кількість проблем технічного характеру [3]. Як свідчить досвід економічно розвинених країн, найкращим шляхом для реалізації потенціалу РГ є використання нового системного підходу, який розглядає генерацію, акумулювання енергії і пов'язане з ними навантаження в якості мікроенергосистеми або «MicroGrid» [6]. Така система дозволяє реалізувати локальний підхід до управління РГ, таким чином, зменшуючи або усуваючи необхідність в централізованому управлінні. Під час порушення стабільності електропостачання з боку централізованої енергосистеми, РГ і відповідні навантаження можуть відділитися від системи, щоб ізолювати споживачів в межах Microgrid від зовнішнього негативного впливу без шкоди для цілісності системи передачі електроенергії. Можливості секціонування комплексу генерації і навантажень мають потенціал, щоб забезпечити більш високу локальну надійність ніж при забезпеченні електропостачання лише централізованою енергосистемою. Компактний розмір певних джерел РГ дозволяє розмішувати їх оптимальним чином відносно найбільших електричних та теплових навантажень, а використання технологій когенерації та тригенерації дозволяє значно збільшити загальний ККД системи. Такий підхід також дозволяє реалізувати підключення нових джерел генерації за принципом plug-and-play, що значно спрощує процедуру приєднання до мережі та прискорить поширення РГ.

Слід зауважити, що більша частина переваг, особливо економічних, можлива лише при ретельному та обґрунтованому управлінні режимами роботи Microgrid в тісному взаємозв'язку та узгодженою роботою з існуючою централізованою енергосистемою. При цьому ефективна економічна взаємодія з енергетичним ринком має вирішальне значення для максимізації потенційної вигоди від впровадження Microgrid і в кінцевому рахунку створює умови для скорішого впровадження РГ, в першу чергу, в умовах використання відновлюваних джерел енергії (ВДЕ). В такій структурі Microgrid повинен існувати певний «агрегатор», що укладає договори з кожним власником джерела РГ, формує мережі розподілу електричної а в загальному випадку і теплової енергії, та забезпечує їх злагоджену роботу.

Таким чином, Microgrid отримує можливість участі на ринку електроенергії, де виступає як споживач чи джерело енергії. Перед оператором MicroGrid стоїть завдання визначити оптимальний розподіл потужностей між всіма джерелами РГ в залежності від рівноважної ціни на ринку, економічних та екологічних показників кожного із генераторів, потреб споживачів. В подальшому необхідно розробити механізм, що дозволить оператору, з однієї сторони оптимально використовувати ВДЕ, керувати джерелами РГ та контрольованим навантаженням в межах MicroGrid як окремому невеликому умовному енергетичному ринку; з іншої сторони – взаємодіяти з об'єднаною енергосистемою як її частина. В разі необхідності він може обмежити роботу певних власних джерел та віддати перевагу більш дешевій електроенергії з централізованої енергосистеми. І навпаки, при наявності надлишку енергії з боку внутрішніх джерел, зокрема ВДЕ, оператор має змогу продати цю електроенергію на енергоринку.

Одна з проблем, з якими стикається оператор MicroGrid в цій частині своєї діяльності є невизначеність ціни на оптовому ринку електроенергії, перш за все при плануванні роботи доба наперед. Вирішення цього питання необхідно для формування заявки для участі в торгах. З адекватним прогнозом рівноважної ціни ринку на наступну годину чи наступну добу, оператор зможе обрати кращі фінансові рішення. Тобто він, як виробник електроенергії, зможе розробити відповідні стратегії для максимізації свого прибутку, а як споживач – мінімізувати вартість споживання [4]. Досягти цього можна завдяки використанню сучасних методів прогнозування. Але при цьому слід зауважити наступне

Існує кілька категорій методів для прогнозування цін на електроенергію, що застосовуються з різним ступенем успіху, в тому числі так звані фундаментальні моделі, математичні фінансові моделі, моделі на основі теорії ігор, регресійні моделі, а також безліч комбінацій цих методів – так звані гібридні методи [5]. Однак, при виборі відповідного методу короткострокового прогнозування ціни на електричну енергію з метою його використання агрегатором MicroGrid необхідно врахувати той факт, що у даному випадку неможливо використовувати методи, які застосовуються енергоринком чи системним оператором. Зокрема на рівні енергоринку існує можливість отримання широкого спектру різноманітної інформації а саме: які енергоблоки відключені чи будуть відключені, які станції не працюють, де маються обмеження з передачею електроенергії, поточні кліматичні умови в місцях безпосереднього розміщення станцій на основі ВДЕ, заявки обленерго на споживання електроенергії та таке інше. Всі ці фактори безпосередньо впливають на встановлення рівноважної ціни на енергоринку. У цей же час агрегатор MicroGrid не володіє цією інформацією. Тому для вирішення задачі прогнозування ціни у цьому випадку не можливо орієнтуватися на складні багатофакторні моделі прогнозування. На рівні MicroGrid присутні тільки ретроспективні дані відносно коливань цін на енергоринку за певний період часу. Більш того, у багатьох випадках зазначені дані можуть мати певну похибку чи бути частково відсутні. У зв'язку з цим у роботі досліджується можливість використання для короткострокового (доба наперед) прогнозування ціни на електричну енергію математичного апарату **нечітких часових рядів**. Такий підхід передбачає можливість використання при вирішенні задачі як нечіткої (в тому числі лінгвістичної), так і детермінованої (завдяки фазифікації) вихідної інформації.

Нечітким часовим рядом називають впорядковану в рівновіддалені моменти часу послідовність спостережень над деякими процесом, стан якого змінюються в часі, якщо значення стану процесу в момент t_i може бути виражено за допомогою нечіткої мітки x_i . При цьому під нечіткої міткою розуміється нечітку множину або деяку лінгвістичну змінну, що характеризує стан об'єкта дослідження. Таким чином нечіткі часові ряди розширюють перспективи використання вихідної інформації, в якості якої з'являється можливість задіяти як кількісні, так і якісні дані.

Зміни в нечіткому часовому ряду можна розглядати як результат значимого або незначимого впливу невідомих чинників. Вплив незначимих факторів визначає зміни, допустимі в рамках похибок, специфічних для кожної предметної області. Вплив значимих факторів призводить до якісної зміни поведінки часового ряду. Такі якісні зміни отримали назву нечітких тенденцій [1].

Таким чином, нечіткою тенденцією називають нечітку мітку, яка виражає характер зміни (математичний рух) послідовності значень нечіткого часового ряду на заданому інтервалі часу.

Аналіз часових рядів є досить самостійною і обширною областю прикладної математики. Метою аналізу часових рядів є досягнення розуміння причинних механізмів, що зумовили ту чи іншу поведінку досліджуваного процесу в умовах невизначеності, побудова моделей часових рядів, які не тільки пояснюють поведінку процесу, а й можуть бути використані для прогнозу розвитку досліджуваного процесу.

Слід врахувати, що числова і лінгвістична (нечітка) інтерпретації значень є різними, але однаково істотними аспектами абстракції. В цьому випадку математичне моделювання поведінки часового ряду на різних рівнях абстракції дає можливість отримати безліч моделей, які доповнюють одна одну.

Згідно з методологією аналізу часових рядів, відповідна модель може бути представлена у наступному вигляді:

$$x_i = \lambda f(t) + \psi \varepsilon_i + \xi_i \quad (1)$$

У моделі (1) ряд x_t , за яким ведеться спостереження, представляється як сума деякої систематичної компоненти $f(t)$, яка може розглядатися як тенденція, і нерегулярної компоненти ε_t , λ, ψ - дискретні коефіцієнти, значення яких знаходяться в інтервалі $[0, 1]$, ξ_t - випадкова помилка.

При моделюванні числових часових рядів в рамках нечіткого підходу, числові значення заздалегідь перетворюють в нечіткі (фазифікують)

$$\begin{aligned} x_t &= \text{Fuzzy}(x_t), & \tau_t &= \text{Tend}(x_t), \\ \tilde{t}_t &= \text{Fuzzy } t(t_t), & \tau_t &= \text{Tend } t(x_t) \end{aligned}$$

А результат моделювання – дефазифікують

$$x_t = \text{deFuzzy}(x_t)$$

Для побудови моделі часових рядів можуть використовуватися нечіткі логічні правила вигляду «якщо - то», побудовані на підставі спостережень $X = (x_t), t = 1, 2, \dots, n$ і які використовуються для «обчислення» наближених значень $X = (x_t), i = 1, 2, \dots, n$. [1].

Вперше модель нечітких часових рядів для вирішення задачі прогнозування була запропонована в роботі [7]. Основна ідея даного підходу полягала в наступному:

Нехай $Y(t), t = 1, \dots$ є підмножиною деякого універсуму R , на якому визначено нечіткі множини $f_i(t), (i = 1, \dots)$ і при цьому $F(t)$ є множиною $f_1(t), f_2(t), \dots$. В цьому випадку $F(t)$ називається нечітким часовим рядом визначеним на $Y(t), (t = 1, \dots)$. Принципова відмінність між традиційними і нечіткими часовими рядами полягає в тому, що в першому випадку прогнозовані величини є реальними числами, а в другому випадку - нечіткими множинами.

Припустимо $F(t)$ є наслідком $F(t-1)$, тобто $F(t-1) \rightarrow F(t)$. Тоді відношення $R(t, t-1)$ з $F(t) = F(t-1) \circ R(t, t-1)$ розглядається в якості нечіткого відношення між $F(t)$ і $F(t-1)$ і являє собою лінійну модель $F(t)$ першого порядку. При цьому символ \circ позначає операцію композиції нечітких множин (max.min-оператор), а $R(t, t-1)$ являє собою об'єднання всіх нечітких відношень між будь-якими величинами $f_i(t-1)$ множини $F(t-1)$ і $f_j(t-1)$ з множини $F(t)$, тобто

$$R(t, t-1) = \bigcup_{i,j} R_{i,j}(t, t-1), \quad i = 1, \dots, I; \quad j = 1, \dots, J. \quad (2)$$

У задачі прогнозування роль $R(t, t-1)$ по суті полягає в екстраполяції величини $F(t-1)$ в $F(t)$. Використовуючи отримане нечітке відношення $R(t, t-1)$ прогнозовані величини можуть бути обчислені наступним чином:

$$A_{t+1} = A_t \circ R(t, t-1), \quad (3)$$

де A_t – останнє відоме значення параметру, що прогнозується в нечіткій формі;

A_{t+1} – результат прогнозу в нечіткій формі.

Отриманий результат вже безпосередньо використовується для визначення прогнозних значень на підставі (3). Після цього здійснюється інтерпретація отриманих результатів. Зазвичай для практичного застосування результати розрахунків (отримані у вигляді нечітких множин) вимагають дефазифікації [2].

З метою тестування запропонованого підходу були проведені розрахунки по прогнозуванню вартості електроенергії на основі даних Nord Pool. Зокрема, після процедури фазифікації вихідних даних (таб. 1), використовуючи сформоване нечітке відношення (таб. 2), на підставі виразу (3) були отримані наступні прогнозні значення вартості електроенергії:

- при прогнозі за даними 11 години ранку на 12 годину значення вартості після дефазифікації склало 31,17 EUR/МВт·год (фактичне значення 31,25), тобто при цьому відносна похибка складає 0,25%;
- при прогнозі за даними 12 години на 13 годину – 30,86 EUR/МВт·год (30,74); похибка – 0,38 %;
- при прогнозі за даними 13 години на 14 годину – 29,83 EUR/МВт·год (30,76); похибка – 3,02 % і т.д.

Таблиця 1 – Процедура фазифікації детермінованих значень вартості електричної енергії.

№	Вихідні дані			A	A	A	A	A	A	A	A	A	A1	A1	A1	A1	A1	A1
	Дата	Час	Вартість Ел.ен EUR/МВт год	Надзвичайно низька	Дуже низька	Доволі низька	Низька	Значно нижче	Нижче середньої	Трохи нижче	Середня	Трохи вище середньої	Вище середньої	Значно вище середньої	Висока	Доволі висока	Дуже висока	Надзвичайно висока
1	20.03.20	00:00 - 01	26,82	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	20.03.20	01:00 - 02	26,48	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	20.03.20	02:00 - 03	26,4	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	20.03.20	03:00 - 04	26,32	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	20.03.20	04:00 - 05	27,53	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	20.03.20	05:00 - 06	29,22	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	20.03.20	06:00 - 07	31,08	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0,1	0	0	0	0	0
8	20.03.20	07:00 - 08	34,12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,5	1	1	0	0	0
9	20.03.20	08:00 - 09	37,43	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0,5	0,5
1	20.03.20	09:00 - 10	35,54	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,1	0,5	1	1	0,1	0
...

Таблиця 2 – Визначення нечіткого відношення $R(t,t-1)$

	0,5	0,5	0,5	0,5	0,1	0,1	0,1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0,5	1	1	0,5	0,5	0,5	0,1	0,1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0,5	1	1	1	1	0,5	0,5	0,1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0,5	0,5	1	0,5	0,5	1	0,5	0,1	0,1	0,1	0	0	0	0	0	0	0	0
	0,1	0,5	1	1	1	1	0,5	0,5	0,5	0,1	0	0	0	0	0	0	0	0
	0,1	0,5	0,5	0,5	1	1	1	1	0,5	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0	0	0
	0,1	0,1	0,1	0,5	0,5	1	1	1	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,1	0	0	0	0
$R(t,t-1)=$	0	0	0,1	0,1	0,5	0,5	1	1	1	0,5	1	0,5	0,5	0,1	0	0	0	0
	0	0	0	0,1	0,1	0,5	0,5	1	1	0,5	0,5	0,5	0,5	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
	0	0	0	0	0,1	0,1	0,5	1	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
	0	0	0	0	0	0,1	0,1	0,5	0,5	0,5	0,5	1	0,5	1	0,5	1	0,5	0,5
	0	0	0	0	0	0	0,1	0,1	0,5	1	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
	0	0	0	0	0	0	0	0,1	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,1	0,1	0,1
	0	0	0	0	0	0	0	0,1	0,1	0,1	0,5	1	0,5	1	0,5	0,1	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,1	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,1	0	0

Узагальнення отриманих результатів показало, що середня відносна похибка прогнозування не перевищила величини 2,54%, що може вважатися цілком прийнятним для даної задачі, враховуючи неможливість залучення в даному випадку додаткових вихідних даних для уточнення значень прогнозованого параметру.

Висновок. Запропоновано новий підхід до прогнозування вартості електричної енергії, який забезпечує прогнозування часових рядів, елементи яких можуть бути задані як в лінгвістичній, так і в детермінованій формі. Експериментальними дослідженнями підтверджено, що даний метод підходить для прогнозування цінових показників в умовах, коли вихідні дані мають високий рівень невизначеності або існує недостатність інформації. Подальше вдосконалення моделі дозволить створити актуальний інструмент прогнозування вартості електроенергії на наступну добу для практичної діяльності операторів MicroGrid та енергоменеджерів промислових підприємств.

Список використаної літератури

1. Афанасьєва, Т. Моделирование нечетких тенденций временных рядов / Т. В. Афанасьєва. – Ульяновск : УЛГТУ, 2013. – 215 с.
2. Афанасьєва, Т., Сапунков, А., Тонерян, М. Двухступенчатый алгоритм выбора нечеткой модели для прогнозирования временных рядов // Автоматизация процессов управления. – 2015. – № (4). – С. 75-80.
3. Веремійчук, Ю.А., Притискач, І.В., Ярмолюк, О.С., Опришко, В.П. Аналіз функціонування інтегрованих енергопостачальних систем з енергетичними хабами // ScienceRise. – 2016. – № 9.2 (26). – С. 12-18.

4. Weron, R. Electricity price forecasting: A review of the state-of-the-art with a look into the future // International journal of forecasting. – 2014. – № 30(4). – Pp. 1030-1081.
5. Murthy, G., Sedidi, V., Panda, A., Rath, B. Forecasting Electricity Prices in Deregulated Wholesale Spot Electricity Market – A Review // International Journal of Energy Economics and Policy. – 2014. – № 4(1). – p. 32.
6. Попов, В., Замковой, П., Дмитренко, И., Luciane, N. Многокритериальный выбор структуры и параметров элементов Microgrid с учетом неопределенности исходной информации // Праці Інституту Електродинаміки Національної Академії Наук України. – 2015. – № 42. – С. 8-12.
7. Song, Q., Chissom, B. Forecasting enrollments with fuzzy time series – Part I // Fuzzy Sets and Systems. – 1993. – № 54. – Pp. 1-9.

УДК 621.311.1: 620.92

В.А. Попов, д-р техн. наук, проф
П.А. Замковий, аспірант
Д.С. Поплавец, студент
Л.В. Охота, студент

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»
ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ЦЕН НА ЭЛЕКТРИЧЕСКУЮ ЭНЕРГИЮ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
НЕЧЕТКИХ ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ

Краткосрочное прогнозирование стоимости электрической энергии на оптовом рынке является необходимым условием для эффективного участия в торгах оператора Microgrid и соответствующих подразделений промышленных предприятий. Краткосрочное прогнозирование цены имеет важное значение для определения оптимального распределения мощностей между распределенными источниками генерации и их согласованной работы со средствами аккумулирования энергии, управляемой нагрузкой, и энергосистемой. В работе представлено краткое описание и приведены основные математические зависимости теории нечеткого моделирования временных рядов и методики их прогнозирования. Такой подход предусматривает возможность использования как нечеткой (в том числе лингвистической), так и детерминированной (благодаря фазсификации) исходной информации. Экспериментальные расчеты показали перспективность применения нечеткого подхода для решения проблемы прогнозирования временных рядов на примере стоимости электрической энергии, в том числе – в случае отсутствия некоторых статистических данных или возможного наличия в них ошибки.

Ключевые слова: нечеткие временные ряды, Microgrid, краткосрочное прогнозирование цены, распределенная генерация.

V. Popov, Dr. Eng. Sc., Prof.,
P. Zamkovyi, postgraduate student,
D. Poplavets, student
L. Okhota, student

National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»
FUZZY TIME SERIES FOR ELECTRICITY PRICE FORECASTING

The short term price forecasting on the wholesale electricity market is a necessary daily task for Microgrid operator and the relevant departments of enterprises effective participation in the bidding. Short-term price forecasting is essential and determining for optimal dispatch of power between the dispersed generation sources and for their coordinated work with energy storage, grid and controlled load. This paper presents a brief description and the basic equations of the theory of fuzzy time series modeling and forecasting techniques. This approach provides the use of a fuzzy (including linguistic) and deterministic initial information. Experimental calculations have shown promising application of fuzzy approach to solve the forecasting problem of time series (for example, the cost of electricity), including in case of absence of some statistics or if data have errors.

Key words: fuzzy time series, Microgrid, short-term price forecasting, distributed generation

References

1. Afanas'eva, T. Modeling of time series fuzzy tendencies / T. V. Afanas'eva. – Ulyanovsk : UIGTU 2013. – 215 с.
2. Afanas'eva, T., Sapunkov, A., Tonerjan, M. The two-stage algorithm of choosing the fuzzy model for time series forecasting // *Avtomatizacija processov upravlenija*. – 2015. – № (4). – Pp. 75-80.
3. Veremiichuk, Yu., Prytyskach, I., Yarmoliuk, O., Opryshko, V. The analysis of the operating properties of integrated intelligent energy supply systems with energy hubs. // *ScienceRise*. – 2016. – № 9.2 (26). – Pp. 12-18.
4. Weron, R. Electricity price forecasting: A review of the state-of-the-art with a look into the future // *International journal of forecasting*. – 2014. – № 30(4). – Pp. 1030-1081.
5. Murthy, G., Sedidi, V., Panda, A., Rath, B. Forecasting Electricity Prices in Deregulated Wholesale Spot Electricity Market – A Review // *International Journal of Energy Economics and Policy*. – 2014. – № 4(1). – p. 32.
6. Popov, V., Zamkoviy, P., Dmytrenko, I., Luciane, N. Multicriteria choice of the structure and parameters of microgrid elements taking into account the uncertainty of the initial information // *Pratsi IED NANU*. – 2015. – № 42. – Pp. 8-12.
7. Song, Q., Chissom, B. Forecasting enrollments with fuzzy time series – Part I // *Fuzzy Sets and Systems*. – 1993. – № 54. – Pp. 1–9.

Надійшла 23.06.2017

Received 23.06.2017

ЕНЕРГЕТИЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ТА ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ ENERGY EFFICIENCY AND ENERGY SAVING

УДК 621.316

М.Я. Островерхов, д-р техн. наук, проф.

М.О. Реуцький, канд. техн. наук

Д. Я. Трінчук, аспірант

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

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПЕРЕТВОРЕННЯ ЕНЕРГІЇ В ПРИВОДІ ЕЛЕКТРОСКУТЕРА В ЗАЛЕЖНОСТІ ВІД СИСТЕМИ ЖИВЛЕННЯ ТА НАВАНТАЖЕННЯ

На сьогодні у світі існує тенденція із обмеження споживання природних ресурсів, одним із наслідків якої є поступовий перехід від автомобілів із двигунами внутрішнього згорання до електромобілів. Система приводу останніх також неідеальна, зокрема через високий внутрішній опір автономного джерела живлення. Ефективність перетворення енергії в ній може бути покращена за рахунок підключення суперконденсаторів паралельно до акумулятора. В роботі на основі комп'ютерної моделі проведено аналіз ефективності використання суперконденсатора в електричному транспорті з автономним живленням при роботі в усталеному режимі та при відпрацюванні моделі на міський їздовий цикл. Отриманий числовий результат показав, що підключення суперконденсатора покращує енергетичну ефективність автономного електропривода.

Ключові слова: електроскутер, суперконденсатор, енергоефективність, їздові цикли.

Постановка проблеми. Автомобільні дороги у світі загалом та в Україні зокрема все більше займають електромобілі. Люди обирають цей вид транспорту не тільки тому що він екологічніший, а й тому, що електромобілі споживають менше енергії і, таким чином, вигідніші. Незважаючи на це, їхня енергетична ефективність хоч і більша, ніж у автомобілів з двигунами внутрішнього згорання, проте може бути покращена. В приводі цих транспортних засобів в якості джерела енергії зазвичай використовуються літій-іонні акумулятори, котрі мають одні з найвищих показників питомої енергії. Одним з можливих перетворювачів енергії є двигун постійного струму (ДПС) [4], що живиться від силового перетворювача з широтно-імпульсною модуляцією (ШІМ). Літій-іонні акумулятори мають високий внутрішній опір, що призводить до зайвих втрат енергії. Для зменшення внутрішнього опору джерела живлення паралельно до акумулятора можна підключити батарею суперконденсаторів, оскільки останні мають суттєво менший активний опір, а також менш чутливі до ударних струмів [7].

Метою дослідження є оцінка ефективності роботи електричного привода транспортного засобу, у якому в якості джерела живлення використовується акумулятор з паралельно під'єднаним суперконденсатором.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Використання паралельного з'єднання акумулятора із суперконденсатором було запропоновано в роботі [7]. В ній були проведені дослідження впливу суперконденсатора на акумулятор при роботі на навантаження, проте не було досліджено вплив такого підключення на саме навантаження, тобто на електродвигун.

Більш детальні дослідження такої системи електропривода були проведені в роботах [1-3]. В них показана ефективність такого виду живлення для гібридних транспортних засобів. У гібридних автомобілях електропривод живиться від силового генератора або від акумулятора. Такий режим роботи є «важким» як для акумулятора, так і для двигуна, на відміну від чистого електромобіля, в яких використання суперконденсаторів є більш доцільним.

В роботі [6] досліджено вплив системи живлення «акумулятор-суперконденсатор» на двигун гіпотетичного електромобіля. Але це дослідження базується лише на абстрактних об'єктах, без прив'язки до реальних транспортних засобів та їхніх навантажувальних характеристик.

В наведених роботах не бралось за мету дослідити вплив такої системи живлення саме на енергоефективність транспортного засобу. В даному дослідженні проведено аналіз ефективності перетворення енергії в приводі електроскутера при окремо взятому усталеному режимі роботи, а також для більш наближеного до реальності режиму роботи на міський їздовий цикл. Результати цього

дослідження зможуть показати доцільність використання суперконденсаторів в системі живлення електроприводу транспортних засобів з автономним живленням.

Вибір елементів електропривода. Дослідження електропривода проведено на прикладі електроскутера Genata Gtle 250 з наступними характеристиками: потужність – 1,6 кВт; максимальна швидкість – 55 км/год; максимальна відстань – 80 км при швидкості 30 км/год; маса – 45 кг; максимальне завантаження – 150 кг.

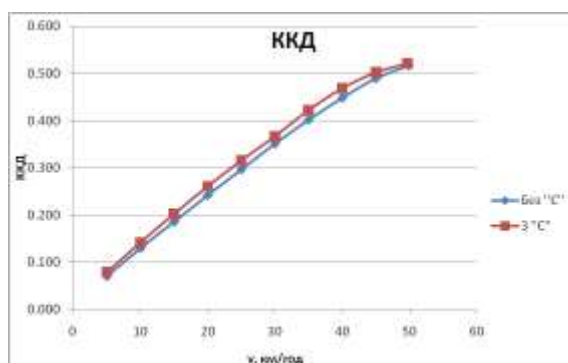
В якості електромеханічного перетворювача для привода електроскутера обрано два двигуни постійного струму марки ИУС-0.8, що ключені паралельно. Основні заводські параметри двигуна наступні: напруга живлення – 28 В; корисна механічна потужність – 800 Вт; номінальний коефіцієнт корисної дії – 0,74; частота обертання ротора – 6500 7700 об/хв; маса – 8,7 кг. Додаткові параметри двигуна, такі як електричні опори та індуктивності обмоток, момент тертя були визначенні із проведеного розрахунку двигуна на базі заводських параметрів.

Для живлення електропривода, враховуючи високі вимоги з питомої енергії, енергоефективності та низького внутрішнього опору, було вибрано батарею літій-полімерних акумуляторів Polymer Lithium-ion Rechargeable Battery з наступними параметрами: напруга – 27 В; ємність – 40 А·год; внутрішній опір – 100 мОм; маса – 5,6 кг.

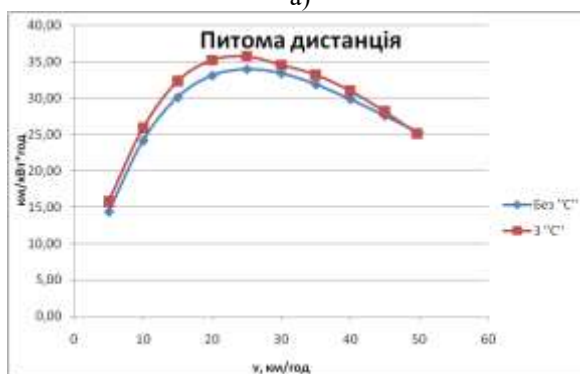
Розглянуті елементи разом із ШІМ-перетворювачем створюють систему електропривода, що живиться лише від акумулятора. Для покращення характеристик живлення була вибрана батарея суперконденсаторів, що складається із 11-ти з'єднаних послідовно суперконденсаторів WIMA SuperCap C з наступними параметрами кожен: номінальна напруга – 2,5 В; ємність – 1200 Ф; внутрішній опір – 0,5 мОм; маса – 235 г. Параметри батареї: номінальна напруга – 27,5 В; ємність – 109,1 Ф; внутрішній опір – 5,5 мОм; маса – 2,585 кг.

Дослідження робочих характеристик для нормального режиму роботи. Нормальний режим роботи визначається як робота електроскутера за нормальних безвітряних погодних умов при перевезенні людини масою 70 кг асфальтованою дорогою без схилу. Питома дистанція – відстань, яку може проїхати електроскутер за одиничну енергію запасену в акумуляторі.

Моделювання та дослідження приводу електроскутера здійснено на основі комп'ютерної моделі, адекватність якої перевірена на експериментальній установці [5]. Результати дослідження представлені на рис. 1.



а)



б)

Рисунок 1 – Робочі характеристики електроскутера для нормального режиму роботи з використанням суперконденсатора та без нього: а – залежність ККД; б – питома дистанція

Як видно з рис.1, використання в системі живлення приводу електроскутера суперконденсатора дозволяє покращити енергоефективність. Зокрема ККД електропривода підвищується на величину від 4 % до 12,5 % в залежності від швидкості електроскутера, що дозволяє збільшити шлях на величину до 10%, який можна проїхати на одному заряді.

Дослідження робочих характеристик при роботі на міській їздовий цикл. Оскільки електроскутер зазвичай застосовується для їзди в межах міста, то для дослідження його приводу був обраний європейський їздовий міський цикл The UN/ECE Elementary Urban Cycle. Результати досліджень зображені на рис. 2.

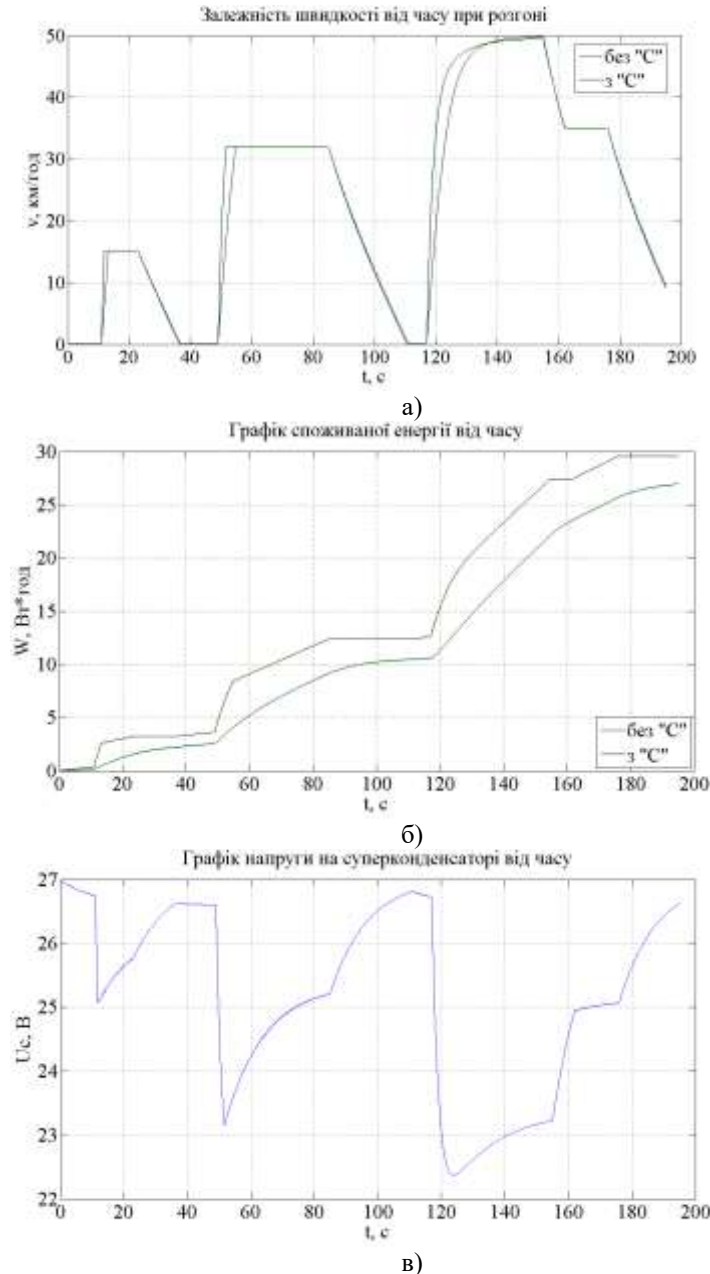


Рисунок 2 – Міський їздовий цикл:

- а) швидкість електроскутера; б) спожита енергія;
в) напруга на суперконденсаторі.

Графіки на рис. 2а, по суті, мають вигляд міського їздового циклу. Рис. 2а відображає, як змінюється швидкість транспортного засобу з часом. На ньому також помітно, що при наявності суперконденсатора електроскутер розганяється до заданих швидкостей швидше. Рисунок 2в демонструє зміну напруги на суперконденсаторі в часі, що дозволяє прослідкувати, як протікає енергія в залежності від режиму роботи, а також контролювати, аби суперконденсатор не розрядився занадто сильно.

Для порівняння витрат енергії на один і той самий їздовий цикл без використання суперконденсатора та з ним розраховано енергію для дозарядки суперконденсатора до напруги 27 В

$$\Delta W = \frac{c \cdot U_n^2}{2} - \frac{c \cdot U_k^2}{2} = \frac{109,1}{2} \cdot (27^2 - 26,63^2) = 1082,4 \text{ Дж} = 0,30 \text{ Вт} \cdot \text{год},$$

(1)

де $c = 109,1 \text{ Ф}$ – ємність суперконденсатора;

$U_n = 27 \text{ В}$ – напруга акумулятора;

$U_k = 26,63 \text{ В}$ – напруга на суперконденсаторі на момент закінчення їздового циклу, що визначена при моделюванні.

Отже загальні витрати енергії без використання суперконденсатора склали 28,52 Вт·год, а з ним – 26,95+0,30=27,25 Вт·год. Це означає, що окрім інших переваг суперконденсатор дозволяє зекономити 4,5% енергії на міському їздовому циклі.

Висновки. Дослідження ефективності перетворення енергії в приводі електроскутера показали, що використання в системі живлення суперконденсатора дозволяє збільшити ККД електропривода на величину від 4% аж до 12,5% від базової величини в залежності від швидкості електроскутера. Дослідження роботи на міський їздовий цикл встановили, що застосування суперконденсатора паралельно з акумулятором при їзді в місті дозволяє зекономити 4,5% енергії. Це забезпечує пересування електроскутером дешевшим та дозволяє збільшити відстань, яку може він проїхати між підзарядками акумулятора.

Список використаної літератури

1. Cristina Pitorac. Using Li-Ion accumulators as traction batteries in the automotive industry. Cost reduction using ultra-capacitors // International Conference on Development and Application Systems. – 2016. – р. 212-218.
2. S. Butterbach, B. Vulturescu, G. Coquery, Ch. Forgez, G. Friedrich. Design of a supercapacitor-battery storage system for a waste collection vehicle // IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference. – 2010. – р. 1-6.
3. Sanfeng Liu, Jun Peng, Liran Li, Xiaohui Gong, Honghai Lu. A MPC based energy management strategy for battery-supercapacitor combined energy storage system of HEV // 35th Chinese Control Conference. – 2016. – р. 8727-8731.
4. Zhi Yang, Fei Shang, Ian P. Brown, Mahesh Krishnamurthy. Comparative Study of Interior Permanent Magnet, Induction and Switched reluctance Motor Drives for EV and HEV Applications // IEEE Transactions on Transportation Electrification. - 2015. – Iss 1/3. – PP. 245-254.
5. Островерхов М.Я., Реуцький М.О., Трінчук Д.Я. «Дослідження робочих режимів нелінійного електричного кола з автономним джерелом живлення в транспортних засобах на прикладі електроскутера». Проблеми енергоресурсозбереження в електротехнічних системах. Наука, освіта і практика – Кременчук, 2016 р. – №1. – с. 75-77.
6. Реуцький М.О., Трінчук Д.Я., Дешко А.О. «Застосування суперконденсаторів у приводі електромобіля на базі двигуна постійного струму з незалежним збудженням». Міжнародна науково-технічна конференція молодих учених, аспірантів, студентів. Сучасні проблеми електроенергетичної та автоматики – Київ, 2014 р.
7. Шидловский А.К., Павлов В.Б., Попов А.В. Применение суперконденсаторов в автономном аккумуляторном электротранспорте // Технічна електродинаміка. – 2008. – № 4. – С. 43–47.

УДК 621.316

М.Я. Островерхов, д-р техн. наук, проф.

М.О. Реуцький, канд. техн. наук

Д.Я. Трінчук, аспірант

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

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЭНЕРГИИ В ПРИВОДЕ ЭЛЕКТРОСКУТЕРА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ СИСТЕМЫ ПИТАНИЯ И НАГРУЗКИ

На сьогоднішній день в мирі існує тенденція по обмеженню потреби природних ресурсів. Одним із проявів цієї тенденції є поступовий перехід від автомобілів на двигателях внутрішнього згорання до електромобілів. Однак, система приводу останніх також неідеальна, в частині із-за високого внутрішнього опору автономного джерела живлення, і

эффективность преобразования энергии в ней тоже может быть улучшена за счёт подключения суперконденсаторов параллельно к аккумулятору. В данной работе с использованием компьютерной модели электропривода произведён анализ эффективности использования суперконденсатора в электротранспорте с автономным питанием при работе в установившемся режиме и при отработке модели на городской ездовой цикл. Полученный числовой результат показал, насколько сильно подключение суперконденсатора улучшает энергетическую эффективность электропривода.

Ключевые слова: электроскутер, суперконденсатор, энергоэффективность, ездовые циклы.

M. Ostroverkhov, Dr. Eng. Sc., Prof.,

M. Reutskyi, Cand. Sc. (Eng.),

D. Trinchuk, postgraduate student,

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

**RESEARCH OF THE ELECTRIC SCOOTER DRIVE ENERGY TRANSFORMATION
EFFICIENCY DEPENDING ON POWER SUPPLY AND LOAD**

In modern world society there is a tendency to decrease natural resources consumption. This leads to switch-over from the internal combustion engine vehicles to the electric vehicles. However, the electric drive system of the latter is not perfect as well, particularly due to high impedance of the independent power supply. So the efficiency of this system can be improved with the connection of supercapacitors in-parallel to the accumulator. This research, provided with the help of a computer model of the electric drive, was made to analyze the effectiveness of utilizing supercapacitors in electric vehicles with independent power supply by testing the computer model on steady-state working modes as well as on the urban driving cycle. The obtained numeric result has shown the increasing of the electric drive efficiency caused by the including a supercapacitor to the drive power supply.

Key words: electric scooter, supercapacitor, energy efficiency, driving cycles.

References

1. Cristina Pitorac. (2016). Using Li-Ion accumulators as traction batteries in the automotive industry. Cost reduction using ultra-capacitors. International Conference on Development and Application Systems, 212-218.
2. S. Butterbach, B. Vulturescu, G. Coquery, Ch. Forgez, G. Friedrich. (2010). Design of a supercapacitor-battery storage system for a waste collection vehicle. IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, 1-6.
3. Sanfeng Liu, Jun Peng, Liran Li, Xiaohui Gong, Honghai Lu. (2016). A MPC based energy management strategy for battery-supercapacitor combined energy storage system of HEV. 35th Chinese Control Conference, 8727-8731.
4. Zhi Yang, Fei Shang, Ian P. Brown, Mahesh Krishnamurthy. (2015). Comparative Study of Interior Permanent Magnet, Induction and Switched reluctance Motor Drives for EV and HEV Applications. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 1/3, 245-254.
5. M. Ostroverkhov, M. Reutsky, D. Trinchuk (2016). Study off operation modes of nonlinear electric circuit with independent power supply in vehicles by example of an electric scooter (Ukr). Problems of energy and resource saving in electrical systems. Science, education, and practice, 1, p. 75-77.
6. Reutsky M., Trinchuk D., Deshko A. (2014). Supercapacitor usage in electric vehicle drives on the example of DC motor with independent excitation (Ukr). International Scientific-Engineering Conference of Young Scientists, Post-Graduates, Students. Modern Problems of Electric Power Engineering and Automatics.
7. Shidlovskiy A., Pavlov V., Popov A. (2008). Supercapacitor usage in independent accumulator electric vehicles. Technical electro-dynamics (Rus), 4, 43-47.

Надійшла 31.05.2017

Received 31.05.2017

В.П. Розен, д-р техн. наук, проф.
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Л.В. Давиденко, канд.техн.наук, доц.
Н.В. Давиденко, аспірант
Луцький національний технічний університет

ПРОЦЕДУРА ПОБУДОВИ БАЗОВОГО РІВНЯ ЕЛЕКТРОСПОЖИВАННЯ ОБ'ЄКТІВ ВОДОПОСТАЧАННЯ З УРАХУВАННЯМ ВПЛИВУ ЗОВНІШНІХ ЧИННИКІВ

В статті розглянуто питання удосконалення процедури побудови моделі електроспоживання об'єктів водопостачання як частини етапу енергетичного планування в системі енергоменеджменту. Обґрунтовано взаємозв'язок задачі планування витрат електроенергії із добовим водоспоживанням, на яке впливають кліматичні та соціальні чинники. Для урахування їх впливу запропоновано виконати пошук спільних рис у добових графіках витрати води з мережі за допомогою кластерного аналізу. Сформовані кластери відображають вплив сезонів року і специфіку водоспоживання в робочий та вихідний (святковий) дні та дозволяють визначити часовий період для збору даних щодо змінних, які впливають на електроспоживання. Модель електроспоживання представлено рівнянням багатфакторної регресії, область використання якого обмежується зміною сезонної витрати води та типом дня, що визначає режим роботи насосних агрегатів. Використання запропонованих принципів дозволяє враховувати параметри режиму водоподачі для даного дня та виконати побудову базового рівня електроспоживання, диференційованого до сезону року і дня тижня.

Ключові слова: система комунального водопостачання, модель електроспоживання, базовий рівень електроспоживання.

Вступ Енергетична ефективність є одним із пріоритетів в сучасних умовах. Забезпечення підвищення загальної ефективності функціонування складної виробничої системи є можливим за умови забезпечення ефективного використання енергоресурсів в усіх її структурних об'єктах. Проблема управління енерговикористанням має цілісний характер і вимагає урахування як явних, так і прихованих причинно-наслідкових зв'язків. Ключовим елементом ефективного управління енерговикористанням та забезпечення високого рівня енергоефективності, згідно [1], є підходи, спрямовані на створення системи енергетичного менеджменту; системний підхід до забезпечення енергоефективності (урахування всіх значущих аспектів і всіх взаємозв'язків між процесами); послідовне вдосконалення енергоефективності; розробка та впровадження методів вдосконалення енергоефективності, включаючи моніторинг і контроль. Система енергетичного менеджменту підприємства – це частина загальної системи управління підприємством, головним завданням якої є управління ефективністю споживання паливно-енергетичних ресурсів, а основною метою є досягнення високої енергетичної ефективності господарювання при одночасному раціональному використанні всіх його ресурсів. Відповідно до стандарту ISO 50001 енергетичний менеджмент має виконуватися у безперервному циклі, основою якого є цикл Демінга PDCA: Плануй (Plan) - Дій (Do) - Перевірйай (Check) - Коригуй (Act) [2]. Частиною планування циклу PDCA є енергетичне планування, яке передбачає проведення енергетичного аналізу для розуміння використання та споживання енергії, його оцінки, виявлення тенденцій, сезонних коливань, інших змінних чинників, від яких залежить споживання енергії. Величина енергоспоживання на будь-якому виробничому об'єкті залежить від різноманітних чинників: параметрів технологічного процесу, технічного стану технологічного та енергетичного обладнання тощо, які до того ж можуть впливати один на одного. Результатом енергетичного аналізу є інформація та дані, необхідні для встановлення базового рівня енергоспоживання (БРЕ) [3]. Розробка керуючих дій здійснюється на основі зіставлення результатів вимірювань із завданням - запланованими показниками, базовим рівнем енергоспоживання [4]. БРЕ повинен бути унормованим до змінних, що впливають на енергоспоживання; часовий період базового рівня енергоспоживання повинен бути типовим для коливань в організаційних операціях; а дані щодо визначальних змінних та фактичного енергоспоживання повинні представляти той самий часовий період, що й БРЕ [3]. Тобто, базовий рівень енергоспоживання являє собою певну математичну модель споживання палива або енергії, побудовану для окремого виробничого об'єкту, залежно від чинників, які суттєво впливають на величину витрати енергії при здійсненні відповідних технологічних процесів. Системи подачі і розподілу води належать до найбільш енергоємних об'єктів житлово-комунального

господарства країни. Під час експлуатації система комунального водопостачання (СКВ) піддається впливу багатьох чинників, тобто, формування режиму електроспоживання здійснюється під впливом внутрішніх та зовнішніх факторів, які потребують урахування під час визначення базового рівня енергоспоживання.

Мета статті Удосконалення процедур планування енергоспоживання в системі комунального водопостачання шляхом розробки принципів урахування впливу зовнішніх чинників під час побудови базового рівня енергоспоживання.

Основні матеріали дослідження Серед підсистем, що приймають участь у формуванні енергоефективності СКВ, найбільш значимою є підсистема насосних станцій, зокрема, підсистема насосного обладнання другого підйому [5]. Величина витрат електроенергії, що споживається насосною станцією водопостачання за деякий період залежить від багатьох взаємопов'язаних чинників, основними з яких є: обсяги піднятої з свердловин або поданої споживачеві води; напір, створюваний насосними агрегатами (НА); надлишковий напір в диктуючих точках водопровідної мережі; технічні параметри елементів насосної станції: продуктивність НА, коефіцієнт корисної дії НА тощо. Ефективність роботи насосного обладнання суттєво залежить від режимів водоспоживання [6]. Найважчим є безпосередній зв'язок завдання планування витрат електроенергії із добовим водоспоживанням. Забезпечення ефективного електроспоживання вимагає як оптимізації самого режиму електроспоживання об'єктів водопостачання, так і оптимізації технологічного процесу водопостачання. При цьому, основним принципом організації ефективного режиму водопостачання має бути такий: водоподача повинна максимально відповідати водоспоживанню. Але водоспоживання – випадковий процес. На нього впливає низка факторів - час доби, зміна укладу життя населення протягом року, у вихідні та святкові дні, сезонні відключення опалення та гарячого водопостачання, зміна температури зовнішнього повітря тощо.

Отже, соціальні та кліматичні чинники належать до збурюючих зовнішніх чинників, які визначають режим водоподачі, а отже й ефективність режиму електроспоживання насосної станції. Урахування впливу соціальних особливостей та чинників зовнішнього середовища на характер добового водоспоживання є необхідною умовою реалізації процедур-алгоритмів планування ефективних режимів водоподачі та електроспоживання для кожного з характерних днів.

Сучасні світові тенденції у галузі управління енергоефективністю відповідно стандарту ISO 50001 передбачають широке впровадження автоматизованих систем обліку енергоресурсів, управління технологічними процесами, які є складовою частиною загальної системи моніторингу, а також інформаційних систем енергоменеджменту. Наявність автоматизованих систем управління спрощує збір та обробку інформації по кожному із об'єктів системи комунального водопостачання. Впровадження системи моніторингу забезпечує можливість створення великих баз даних, що містять інформацію про параметри режимів роботи об'єктів СКВ, використання методів інтелектуального аналізу даних для вивчення постійно зростаючих об'ємів інформації та виявлення прихованих закономірностей, що визначають формування технологічних режимів об'єктів водопостачання та електроспоживання.

Основним режимним показником процесу водопостачання є добовий графік витрати води (ГВВ) з мережі [6]. Один із можливих підходів до оптимізації режиму роботи об'єктів водопостачання є попереднє створення бази даних добової витрати води з мережі в межах системи моніторингу режимів СКВ. На основі створеної бази даних можливе здійснення аналізу добового ГВВ, тобто дослідження його основних параметрів для пошуку спільних рис з урахуванням впливу зовнішніх чинників, що визначають процес водоспоживання.

Для опису добового графіка витрати води з мережі слід враховувати загальноприйняті параметри, які відображають абсолютні характеристики режиму водоподачі: середнє, максимальне (мінімальне) значення протягом доби, час, який відповідає максимальному (мініальному) значенню, тривалість періоду протягом якого має місце підвищене (понижене) значення витрати води з мережі; а також додаткові параметри, які є характеристикою нерівномірності самого графіка: дисперсія та середньоквадратичне відхилення, коефіцієнт форми, коефіцієнт максимуму, коефіцієнт заповнення та коефіцієнт нерівномірності, які вважаються класичними показниками нерівномірності добових графіків, при цьому ГВВ розглядається як послідовність випадкових величин.

Разом з тим, як показали дослідження, можлива наявність великої кількості різноманітних за формою графіків з ідентичними значеннями статистичних характеристик, що вимагає їх додаткового аналізування. Природа добового графіка водоподачі дозволяє представити його у вигляді кругової часової діаграми – діаграми радарного типу. Тому, для отримання більш детальної та адекватної оцінки нерівномірності ГВВ доцільно скористатися морфометричним підходом, який є одним з інструментів дослідження різноманітності та аналізу фігур різної форми та розмірів [7].

Задача пошуку спільних рис у характері водоподачі на основі дослідження параметрів добового графіка витрати води може бути розв'язана шляхом формування класів ГВВ, що мають однакові властивості, з використанням теорії розпізнавання образів. Зважаючи на відсутність інформації щодо можливих класів доцільним є використання процедур автоматичної класифікації «без учителя», до якої

належить кластерний аналіз, що дозволяє виявити в даних раніше невідомі закономірності. Об'єктами для проведення кластерного аналізу виступатимуть добові ГВВ. Ознаками, якими описано об'єкти класифікації, є параметри добового ГВВ [6]. Кластером подібних ГВВ - сімейством графіків характерного дня – є група графіків витрати води з мережі, що мають подібні риси. Утворені кластери повинні бути диференційованим відповідно до сезонів року і відображати специфіку водоспоживання в робочий, вихідний та святковий дні.

Для виконання кластерного аналізу вибрано ієрархічний агломеративний метод, який дозволяє будувати дерево класифікації n об'єктів за допомогою ієрархічного об'єднання їх у групи, або кластери, дедалі більш високої схожості на основі заданого критерію [8]. Результатом процедури є побудова дендрограми, яка у формі дерева об'єднання відображає структуру зв'язків між об'єктами. Оскільки одночасне врахування великої кількості різних класифікаційних ознак, які слід використовувати для опису ГВВ, ускладнює інтерпретацію отриманих результатів, то виявлення прихованих закономірностей у добових графіках витрати води з мережі виконувалось у два етапи: 1 - виявлення впливу сезонності; 2 - виявлення впливу соціальних чинників.

Аналіз річного графіка добової витрати води з мережі вказує на коливання об'ємів подачі води залежно від сезону. Тому для опису графіка витрати води з метою виявлення впливу сезонності доцільним є використання характеристик ГВВ за об'ємами водоподачі, а також класичних показників нерівномірності витрати води з мережі. Добові графіки витрати води з мережі характеризуються значною нерівномірністю та відмінністю для різних днів тижня. Тому для виявлення схожості у добових графіках важливим є врахування саме форми ГВВ та доцільним є використання морфометричних показників.

Вихідною інформацією для кластеризації є параметри ГВВ, які утворюють матрицю спостережень, кожен рядок якої містить значення m ознак одного з n об'єктів кластеризації. Формально простір ознак для класифікації є m -вимірним. Але в зв'язку з наявністю кореляції (залежності) між ознаками його слід перетворити в простір меншої розмірності, який містить лише інформативні ознаки. Для цього необхідно виконати дослідження вихідних факторів на тісноту зв'язку та позбавитись мультиколінерності. В результаті сформовано два набори інформативних класифікаційних ознак для виявлення впливу на специфіку водоподачі: 1) фактору сезонності: об'єм добової витрати води з мережі; максимальне значення добової витрати води; мінімальне значення добової витрати води; мінімальне значення витрати води протягом денних годин доби; дисперсія; 2) соціальних чинників, що зумовлені зміною ритму життя населення у робочі, вихідні та святкові дні: периметр; кут між головною віссю ДРТ та віссю абсцис; округлість; видовження; випуклість; головна вісь видовження.

Візуальний аналіз дендрограми (рис. 1, а), отриманої на першому етапі, дозволяє стверджувати: в результаті розбиття отримано п'ять класів ГВВ: 1 клас – «літо» – містить ГВВ, що відповідають періоду профілактичних робіт у системі тепlopостачання та гарячого водopостачання; 2 клас – «зима» – містить ГВВ, що відповідають опалювальному сезону; 3 клас – «весна-літо-осінь» – містить ГВВ, що відповідають весняно-літньо-осінньому періоду; 4 клас – «нерегулярні дні» – містить ГВВ різних місяців та сезонів; 5 клас – 1 січня.

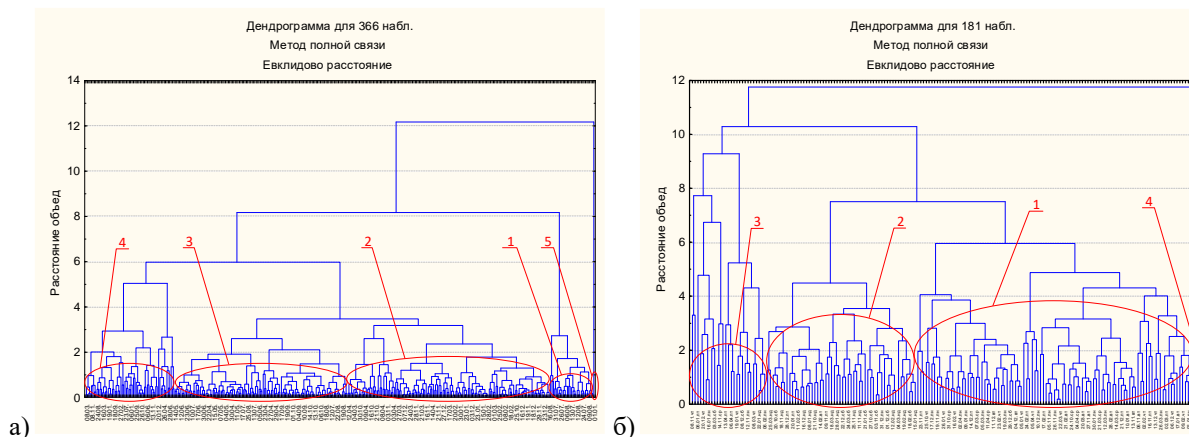


Рисунок. 1 – Дендрограми добових ГВВ для виявлення впливу: а) сезонності; б) соціальних чинників

Подальше дослідження виконувалось з урахуванням результатів, отриманих на першому етапі. Для демонстрації виявлення впливу соціальних чинників було вибрано діапазон значень добових ГВВ 2 класу, які відповідають зимовим місяцям. Аналіз результатів другого етапу (рис. 1, б) дозволяє стверджувати про наявність впливу соціального фактору, зумовленого зміною ритму життя населення у вихідні та святкові дні, на характер витрати води з мережі. В результаті розбиття виділено чотири класи ГВВ: 1 клас – утворюють добові ГВВ, що відповідають вихідним та святковим дням; 2 клас – утворюють добові ГВВ, що відповідають робочим дням; 3 клас – містить ГВВ, що відповідають дням різного типу. Це дозволяє

визначити їх як нерегулярні дні. Їх поява може бути зумовлена соціальними чинниками або ж аваріями та витокami води в мережі; 4 клас - 1 січня.

Як на першому етапі класифікації, так і на другому ГВВ, що відповідає першому січня виділено окремим класом, що лише підтверджує вплив соціальних чинників на характер ГВВ.

Незважаючи на те, що кластерний аналіз має певні недоліки, зокрема, склад і кількість кластерів залежить від методів об'єднання і оцінки дистанційних коефіцієнтів, аналіз отриманих результатів розбиття дозволив зробити такі висновки: чітко проглядається тенденція об'єднання в один кластер добових ГВВ, характерних для певної пори року, що підтверджує вплив сезонності на характер витрати води з мережі; чітко проглядається тенденція об'єднання в один кластер добових ГВВ, що відповідають певному типу дня тижня: вихідний (або святковий) чи робочий; характерним є наявність кластеру «Нерегулярні дні», який об'єднує різні дні різних сезонів та різні дні тижня, наявність якого може бути обумовлена соціальними чинниками (релігійними святами та підготовкою до них населення); погодними умовами (посуха, спека); аварійними ситуаціями в мережі тощо.

Організація моніторингу на постійній основі сприятиме накопиченню бази даних щодо ГВВ та подальшому уточненню їх кластеризації за характером впливу кліматичних та соціальних чинників.

Виявлення спільних рис у ГВВ методами кластерного аналізу забезпечує можливість формування усереднених графіків витрати води для типових днів з метою їх використання для подальшого планування режиму водоподачі, визначення показників енергоефективності насосної станції та моделювання електроспоживання. Комплексний підхід до управління ефективністю електроспоживання в технологічній системі водопостачання заснований на моделі електроспоживання, якою в загальному випадку є функція $Y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$, що відображає залежність між вхідними параметрами та вихідною змінною. Модель електроспоживання повинна бути диференційованою до збурюючих впливів, тобто адаптованою до режиму водоподачі у характерні дні: робочі, вихідні тощо. Таким чином, модель електроспоживання можна представити коротко:

$$W = \langle X, D, K_{ces}, K_{дн} \rangle \quad (1)$$

де W - обсяг споживання електроенергії; X - множина вхідних змінних; D - показник дати, необхідний для відстеження добової динаміки витрати води з мережі; K_{ces} - ознака, що вказує на приналежність дня до сезону; $K_{дн}$ - ознака, що вказує на характер дня (1 - вихідний, 2 - робочий).

Для формалізації урахування впливу сезонності на величину електроспоживання слід визначити усереднене значення добової витрати води та межі її зміни для кожного з утворених кластерів. Як усереднене значення сезонної витрати води з мережі приймаємо вибіркоче математичне сподівання добових витрат води вибірок, утворених відповідними об'єктами певного кластеру:

$$\bar{Q} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m Q_j \quad (2)$$

де m - кількість об'єктів даного кластеру; Q_j - добова витрати води з мережі для j -го дня.

В якості меж зміни сезонної витрати води приймаємо:

$$\begin{aligned} Q_{\min} &= \bar{Q} - s \\ Q_{\max} &= \bar{Q} + s \end{aligned} \quad (3)$$

де s - вибіркоче середньоквадратичне відхилення, визначене з урахуванням оцінки дисперсії для вибірки спостережень:

$$s^2 = \frac{1}{m-1} \sum_{j=1}^m (Q_j - \bar{Q})^2 \quad (4)$$

В якості моделі електроспоживання доцільним є використання рівняння багатofакторної регресії. Область використання отриманої моделі обмежується визначенням для кожного сезону максимальним та мінімальним значенням об'єму поданої в мережу води та режимом роботи насосних агрегатів для типового дня, який визначатиме показники енергоефективності насосної станції водоподачі:

$$\begin{aligned}
 W &= a_0^1 + a_1^1 x_1 + a_2^1 x_2 + \dots + a_n^1 x_n, & Q &\in [Q_{\min 1}, Q_{\max 1}], & K_{\text{дн}} &= 1; \\
 W &= a_0^2 + a_1^2 x_1 + a_2^2 x_2 + \dots + a_n^2 x_n, & Q &\in [Q_{\min 1}, Q_{\max 1}], & K_{\text{дн}} &= 2; \\
 W &= a_0^3 + a_1^3 x_1 + a_2^3 x_2 + \dots + a_n^3 x_n, & Q &\in [Q_{\min 2}, Q_{\max 2}], & K_{\text{дн}} &= 1; \\
 W &= a_0^4 + a_1^4 x_1 + a_2^4 x_2 + \dots + a_n^4 x_n, & Q &\in [Q_{\min 2}, Q_{\max 2}], & K_{\text{дн}} &= 2; \\
 W &= a_0^5 + a_1^5 x_1 + a_2^5 x_2 + \dots + a_n^5 x_n, & Q &\in [Q_{\min 3}, Q_{\max 3}], & K_{\text{дн}} &= 1; \\
 W &= a_0^6 + a_1^6 x_1 + a_2^6 x_2 + \dots + a_n^6 x_n, & Q &\in [Q_{\min 3}, Q_{\max 3}], & K_{\text{дн}} &= 2; \\
 W &= a_0^7 + a_1^7 x_1 + a_2^7 x_2 + \dots + a_n^7 x_n, & Q &\in [Q_{\min 5}, Q_{\max 5}]
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

де x_1, x_2, \dots, x_n – вхідні змінні - чинники, що впливають на ефективність електроспоживання (об'єм поданої в мережу води, тиск в мережі, надлишковий тиск в диктуючих точках мережі, тиск на виході НА, коефіцієнт завантаження насосного обладнання тощо); $a_0, a_1, a_2, \dots, a_n$ – коефіцієнти рівняння, визначені на основі статистичного аналізу даних щодо вхідних змінних та вихідної змінної; Q_{\min}, Q_{\max} – мінімальне та максимальне значення водоподачі відповідно для кластерів за сезоном 1, 2, 3, 5, визначене з урахуванням усередненого значення добової витрати води з мережі для даного сезону та розкиду її значень в межах даного кластеру (нерегулярні дні виключено з розгляду, оскільки характер їх ГВВ потребує додаткового дослідження).

Отже, модель електроспоживання повинна будуватись для кожного з типових днів кожного сезону на основі даних щодо вхідних змінних, визначених з урахуванням режиму водоподачі протягом даної доби. Це дозволить визначити базовий рівень електроспоживання, характерний для конкретного часового проміжку (доби) та запланованого режиму водоподачі.

Для розпізнавання належності добового ГВВ, отриманого з системи моніторингу до певного кластеру необхідним є використання дискримінантного аналізу, суть якого полягає у визначенні правила, що дає змогу відрізнити один клас об'єктів від іншого [8]. Зазвичай, це правило є функцією від результатів спостережень над об'єктом. За результатами проведеної класифікації досліджуваних ГВВ виконується побудова дискримінантних функцій ідентифікації їх приналежності до одного з кластерів, яка відповідно, проводиться у два етапи: 1) визначення приналежності до сезону; 2) визначення приналежності до типу дня. Після ідентифікації характеру ГВВ за сезоном та типом дня визначається базовий рівень електроспоживання, який враховує особливості організації процесу водоподачі для даного типу дня.

Висновки Використання процедур кластерного аналізу дозволяє виявити приховані закономірності у ГВВ, зумовлені кліматичними та соціальними чинниками. Їх врахування забезпечує можливість визначення часового періоду для збору даних щодо визначальних чинників та фактичного електроспоживання та дозволяє виконати побудову моделі електроспоживання, яка враховуватиме параметри попередньо запланованого для даного дня режиму водоподачі. Використання запропонованої процедури сприятиме формуванню базового рівня електроспоживання для конкретного часового проміжку (доби), диференційованого до сезону року і дня тижня.

Список використаної літератури

1. European Commission Integrated Pollution Prevention and Control (IPPC). Reference Document on Best Available Techniques for Energy Efficiency, Seville: Institute for Prospective Technological Studies, European IPPC Bureau, 2009. 430 p. URL:<http://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/ene.html>
2. ДСТУ ISO 50001:2014 (ISO 50001: 2011, IDT) Енергозбереження. Системи енергетичного менеджменту. Вимоги та настанова щодо використання. Київ, 2015. 27 с.
3. ДСТУ ISO 50004:2016 (ISO 50004: 2014, IDT) Настанова щодо впровадження, супровід та поліпшення системи енергетичного менеджменту. Київ, 2016. 38 с.
4. Системи енергоменеджменту та їх математичне забезпечення / Г.Г. Півняк, С.У. Випанасенко, О.І. Хованська та ін. Дніпропетровськ: Національний гірничий університет, 2013. 214 с.
5. Капанский А.А. Моделирование электропотребления в технологической системе водоснабжения. Вестник ГГТУ им. П. О. Сухого. 2016. № 2. С. 74-85
6. Розен В.П., Давиденко Н.В. Формування множини характеристик фактичного режиму водоспоживання в системах комунального водопостачання. Енергетика: економіка, технології, екологія. 2015. № 3 (41). С. 85-92.
7. Коменда Т.І., Коменда Н.В. Морфометричні методи і моделі оцінки та зменшення нерівномірності навантажень систем електропостачання: монографія. Луцьк: Луцький НТУ, 2012. 112 с.
8. Факторный, дискриминантный и кластерный анализ / Дж.-О. Ким, Ч. У. Мьюллер, У. Р. Клекка и др. Москва: Финансы и статистика, 1989. 215 с.

V. Rozen, Dr. Sc. Sciences, prof.
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"
L. Davydenko, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof., N. Davydenko, postgraduate student.

Lutsk National Technical University

ENERGY BASELINE CONSTRUCTION PROCEDURE OF WATER SUPPLY FACILITIES WITH TAKING INTO CONSIDERATION THE EXTERNAL FACTORS EFFECT

The article deals with the improvement tasks of power consumption model construction procedure of water supply facilities as a part of energy planning stage in energy management system.

Interconnection of power consumption planning task with daily water consumption to which influence climatic and social factors have been substantiated. Search of similarities in daily graphs of water consumption from the network using cluster analysis, which is done in two stages, has been proposed to realize for taking into consideration of their influence.

For this based on parameters of description the daily graphs have been formed two sets of informative classification characteristics. Classical indicators of irregularity graphs description have been used to identify the influence of seasonality. Morphometric parameters have been used to detect the influence of social factors. Formed clusters reflect the seasons influence and the water consumption specificity during working and weekend (holiday) days. It allows defining the period for collecting data on values of input variables that influence over the power consumption, and the actual power consumption. Procedure of determining the average value of daily water consumption and limits of its change for each cluster has been proposed for taking into consideration of seasonality influence. The power consumption model has been presented by equation multifactor regression with taking into consideration of characteristics that indicate to accordance of the day to the season and to the character of the day. Field of model use is limited by change of seasonal water consumption and the day type that defines the operation mode of pumping units and its parameters.

Using the proposed principles allows taking into consideration the water supply mode parameters that are previously planned for this day. It also allows getting power consumption model that is differential to season and day of the week, and perform energy baseline construction for a specific period (day).

Keywords: municipal water supply system, power consumption model, energy baseline.

References

1. European Commission Integrated Pollution Prevention and Control (IPPC). Reference Document on Best Available Techniques for Energy Efficiency, Seville: Institute for Prospective Technological Studies, European IPPC Bureau, 2009. 430 p. URL:<http://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/ene.html>
2. DSTU ISO 50001:2014 (ISO 50001: 2011, IDT) Conservation of energy. Energy management systems. Requirements with guidance for use. Kyiv, 2015. 27 p.
3. DSTU ISO 50004:2016 (ISO 50004: 2014, IDT) Energy management systems. Guidance for the implementation, maintenance and improvement of an energy management system. Kyiv, 2016. 38 p.
4. G. Pivnyak, S. Vypanasenko, A. Khovanskaya and others. (2013) Energy systems and their mathematical software. Dnipropetrovsk, 214 p.
5. A. Kapansky Modeling of power consumption in the technological water supply system. Bulletin P. Sukhoi GSTU. 2016. № 2. Pp. 74-85
- 6 V. Rozen, N. Davydenko Forming plural of characteristics of the real regime of water consumption in municipal water supply systems. Power engineering: economics, technique, ecology. 2015. № 3 (41). Pp. 85-92.
7. T. Komenda, N. Komenda (2012) Morphometric methods and models evaluating and decreasing irregularity loads of power supply systems: monograph, Lutsk, Lutsk NTU, 112p.
8. Jae-On Kim, Charles W. Mueller. William R. Klecka (1989) Factor, Discriminant and Cluster Analysis, Moscow, Finansy i statistika, 215 p.

В.П. Розен, д-р техн. наук, проф.

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

Л.В. Давыденко, канд. техн. наук, доц., **Н.В. Давыденко**

Луцкий национальный технический университет

ПРОЦЕДУРА ПОСТРОЕНИЯ БАЗОВОГО УРОВНЯ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ ОБЪЕКТОВ ВОДОСНАБЖЕНИЯ С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ ВНЕШНИХ ФАКТОРОВ

В статье рассмотрены вопросы усовершенствования процедуры построения модели электропотребления объектов водоснабжения как части этапа энергетического планирования в системе энергоменеджмента. Обосновано взаимосвязь задачи планирования расходов электроэнергии с суточным водопотреблением, на которое влияют климатические и социальные факторы. Для учета их влияния предложено выполнить поиск общих черт в суточных графиках расходы воды из сети с помощью кластерного анализа. Сформированы кластеры отражают влияние сезонов года и специфику водопотребления в рабочее и выходной (праздничный) дни и позволяют определить временной период сбора данных о переменных, влияющих на электропотребление. Модель электропотребления представлены уравнением многофакторной регрессии, область использования которого ограничивается изменением сезонной расхода воды и типом дня определяет режим работы насосных агрегатов. Использование предложенных принципов позволяет учитывать параметры режима водоподачи для данного типа дня и выполнить построение базового уровня электропотребления, дифференцированного к сезону года и дня недели.

Ключевые слова: система коммунального водоснабжения, базовый уровень электропотребления, модель электропотребления

Надійшла 22.09.2017

Received 22.09.2017

УДК 621.31

В.В. Макаренко, канд. техн. наук, доц.,

В.М. Спивак, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., доц.,

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

Анализ эффективности использования синхронных выпрямителей в импульсных источниках питания

Эффективность использования синхронного выпрямителя в преобразователях переменного / постоянного тока и постоянного / постоянного тока. Моделирование выпрямителей диода Шоттки, идеальные клавиши и клавиши с использованием МОП-транзисторов. Результаты экспериментов не подтверждают безусловного преимущества синхронных выпрямителей. Предлагается использование комбинированных схем выпрямителей для повышения их эффективности.

Ключевые слова: выпрямители; синхронные; диод Шоттки; МДП-транзисторы; преобразователи; симуляция, Multisim.

Введение. В работах [1-3] отмечается, что применение синхронных выпрямителей на МДП-транзисторах позволяет повысить КПД выпрямителей как в AC/DC-, так и в DC/DC-преобразователях. В [2] даже приведена эффективность применения синхронного выпрямителя совместно с синхронным повышающим контроллером TPS43061 в паре с силовым блоком CSD86330Q3D по сравнению с

использованием несинхронного контроллера и диодов Шоттки. К сожалению, как в этих работах, так и в других отсутствует описание общих закономерностей при использовании синхронных выпрямителей. Как правило рекомендации ограничиваются советами использовать транзисторы с минимальным сопротивлением открытого канала исток-сток.

Если верить этим источникам, то все преобразователи давно нужно перевести на использование синхронных выпрямителей. Однако на практике это далеко не так. Продолжается выпуск преобразователей с использованием диодов Шоттки как в старых, так и в новых разработках.

Целью этой публикации является попытка проследить некоторые закономерности при использовании синхронных выпрямителей и сформировать обоснованные рекомендации по их применению. При этом задачи анализа схем преобразователей не ставятся, а производится только оценка эффективности применения синхронного выпрямителя по сравнению с выпрямителем на диодах Шоттки

Основные решения

Основные решения. Программа NI Multisim для выполнения таких задач подходит наилучшим образом. Для исследования можно использовать как виртуальные устройства с идеальными характеристиками, так и модели реальных полупроводниковых приборов.

Для оценки эффективности использования различных элементов в выпрямителях необходимо сформировать схему преобразователя, в котором осуществляется контроль мощности отдаваемой источником энергии и мощности, отдаваемой в нагрузку. На рис. 1 приведена схема однотактного обратного преобразователя с выпрямителем, построенном на виртуальных идеальных диодах.

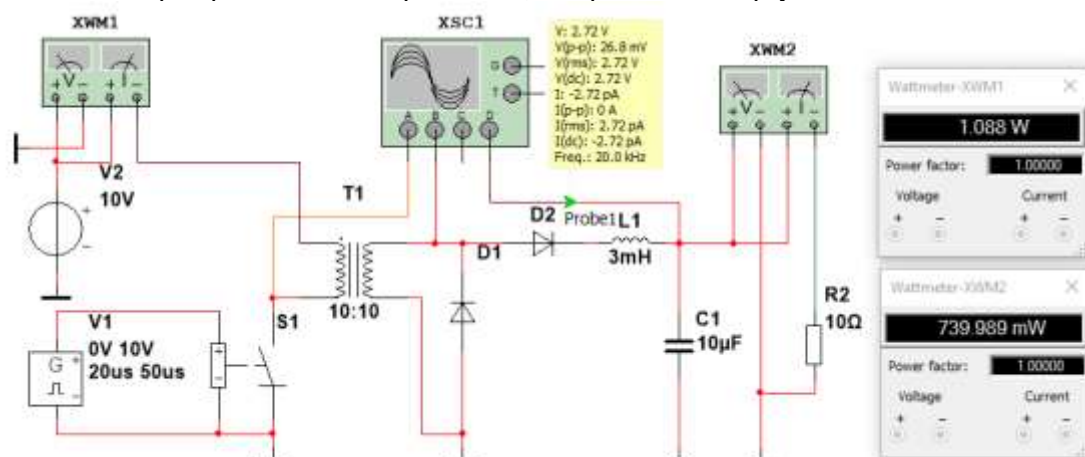


Рисунок 1 – Схема для исследования выпрямителя с LC-фильтром, выполненного на идеальных диодах открытым состоянием R_{on} установлено равным 0.01 мОм (рис. 2).

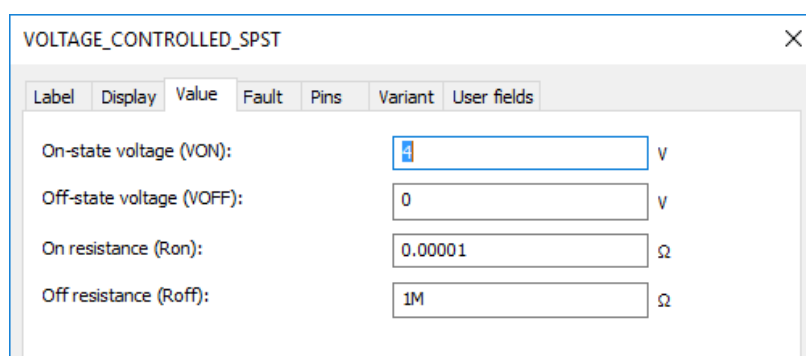


Рисунок 2 – Окно настройки параметров ключа VOLTAGE_CONTROLLED_SPST

Контроль мощности отдаваемой источником питания и в нагрузке осуществляется с помощью ваттметров XMM1 и XMM2, соответственно, а постоянное напряжение и размах пульсаций на выходе контролируется пробником Probe1.

Осциллограммы сигналов, снятые в различных точках схемы, приведены на рис. 3. С учетом того, что сравнивать параметры различных выпрямителей необходимо при одинаковых начальных условиях и для работы синхронного выпрямителя необходимы защитные промежутки между сигналами управления, длительность импульсов управления ключом преобразователя во всех экспериментах установлена равной 20 мкс при периоде их следования равном 50 мкс.

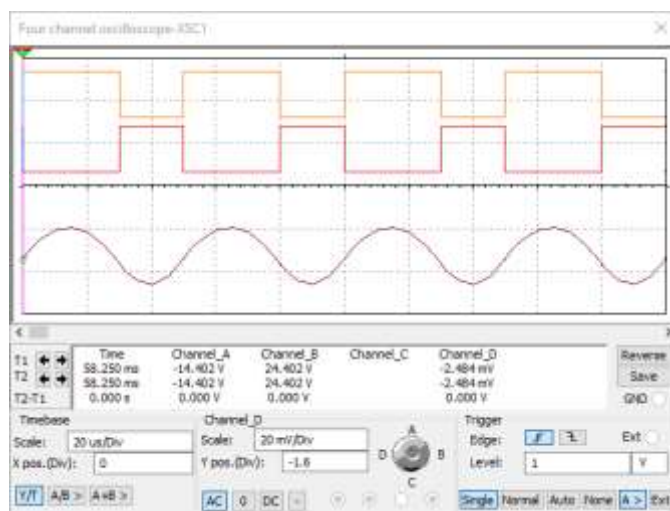


Рисунок 3 – Осциллограммы сигналов на входе и выходе трансформатора, на выходе выпрямителя (нижняя)

Эксперимент показал, что при использовании таких компонентов мощность, отдаваемая источником питания, составила 1.088 Вт, мощность, отданная в нагрузку 0.74 Вт, а КПД – 68%. Размах напряжения пульсаций 26.8 мВ (рис. 1). Для увеличения мощности в нагрузке индуктивность L1 была уменьшена до 20 мкГн, а емкость C1 увеличена до 500 мкФ (для сохранения такого же уровня пульсаций, как и в первом эксперименте), что привело к увеличению выходной мощности до 4.453 Вт и КПД до 88.3%.

Поэтому катушка фильтра была исключена и в дальнейшем использовался емкостной фильтр (рис. 4), емкость конденсатора которого была увеличена до 1000 мкФ.

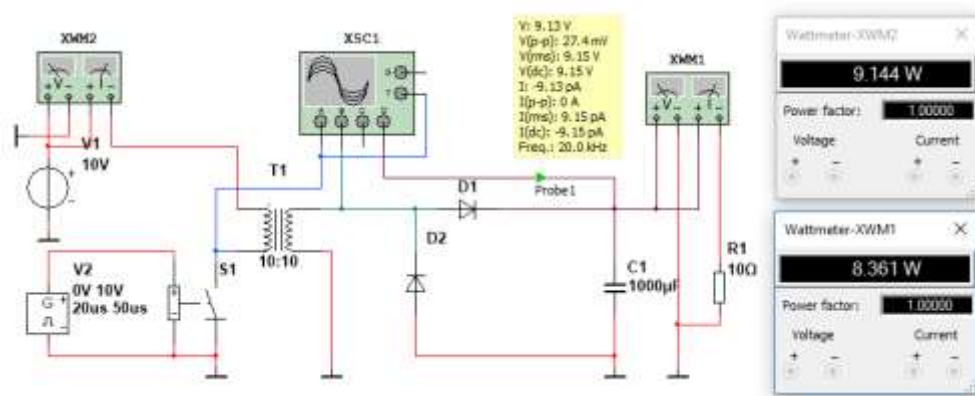


Рисунок 4 – Схема для исследования выпрямителя с емкостным фильтром, выполненного на идеальных диодах

При использовании емкостного фильтра КПД преобразователя составил 91.4%.

На базе схемы, приведенной на рис. 4, создана модель преобразователя с выпрямителем на диодах Шоттки (рис. 5). Временные диаграммы сигналов для этой схемы приведены на рис. 6. КПД с выпрямителем на диодах Шоттки типа 1N5828 составил 96.7%, а с 1N5834 – 97.18%. Увеличение КПД при использовании диодов Шоттки объясняется меньшим прямым падением напряжения на открытом диоде.

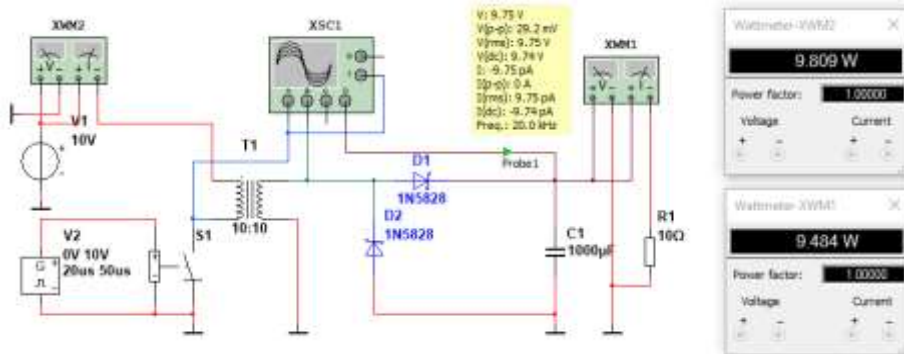


Рисунок 5– Схема для исследования выпрямителя с емкостным фильтром, выполненного на диодах Шоттки

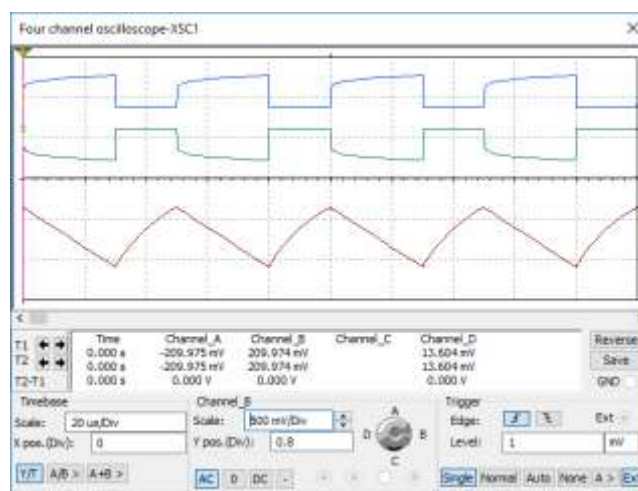


Рисунок 6 – Осциллограммы сигналов на входе/выходе трансформатора и на выходе выпрямителя (нижняя) для схемы, приведенной на рис. 5

Модель преобразователя с синхронным выпрямителем, построенным на идеальных ключах S2 и S3 (рис. 7).

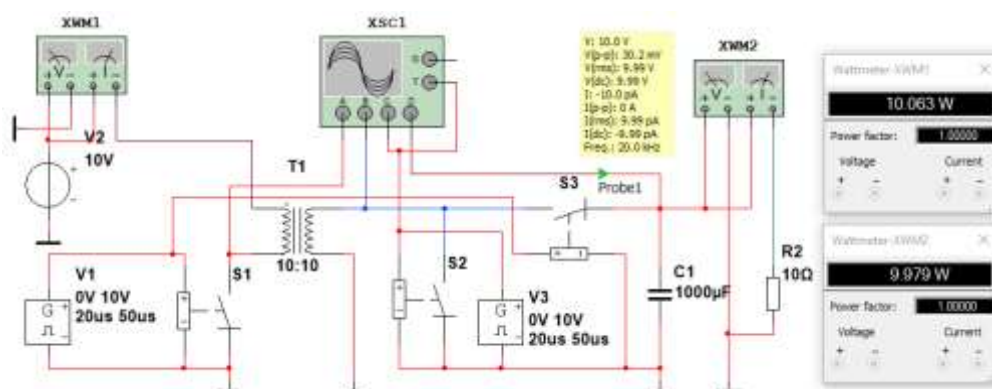


Рисунок 7 – Схема для исследования однополупериодного синхронного выпрямителя с емкостным фильтром, выполненного на идеальных ключах

Для синхронного выпрямителя основным параметром является сопротивление открытого ключа, которое и определяет потери мощности в таком выпрямителе. В качестве источника управляющего сигнала использован генератор прямоугольных импульсов V1, управляющий работой ключа преобразователя S1. Питание преобразователя осуществляется от источника постоянного напряжения 10

В (V2). Гальваническая развязка первичной и вторичной цепи преобразователя осуществляется с помощью идеального трансформатора T1 с коэффициентом трансформации равным единице и активным сопротивлением обмоток 1 мОм.

Управление ключом S2 синхронного выпрямителя осуществляет генератор V3. Так как в Multisim все генераторы, используемые в модели, имеют нулевую начальную фазу колебаний это дает возможность исследовать свойства выпрямителя при изменении времени задержки сигнала управления относительно сигнала, который выпрямляется, используя для этого различные генераторы.

Для первого эксперимента сопротивление открытого ключа S1 (R_{on}) установлено равным 0.01 мОм, а ключей синхронного выпрямителя S2 и S3 равным 1 мОм (рис. 2). Длительность импульсов на выходе генераторов V1 и V2 равной 20 мкс, защитный промежуток 2.5 мкс, период следования импульсов 50 мкс. Осциллограммы сигналов, снятые в различных точках схемы, приведены на рис. 8.

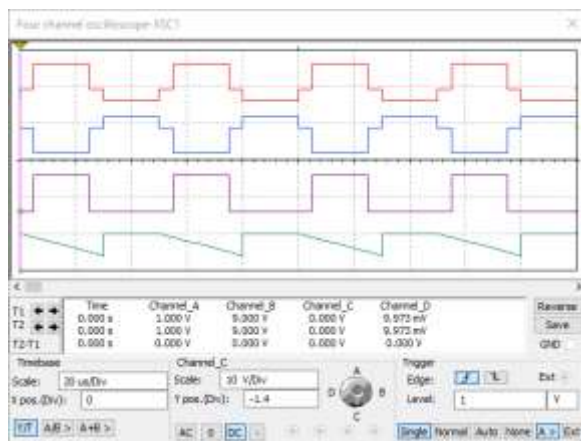


Рисунок 8 – Осциллограммы сигналов на входе/выходе трансформатора, входе управления ключа S2 и на выходе выпрямителя (нижняя) для схемы, приведенной на рис. 7

Нижняя осциллограмма на рис. 8 иллюстрирует пульсации напряжения на нагрузке. В результате проведенного эксперимента удалось выяснить, что мощность в нагрузке (при указанных выше параметрах моделирования) составила 9.979 Вт, а мощность, отдаваемая источником питания 10.063 Вт, что соответствует КПД 99.2%.

Таким образом синхронный выпрямитель на идеальных ключах показал наиболее высокий результат по КПД из всех рассмотренных схем. Для проверки зависимости КПД от сопротивления открытого ключа (S2 и S3) было проведено еще два эксперимента в которых R_{on} устанавливалось равным 0.01 и 0.1 Ом. При сопротивлении ключа 0.01 Ом КПД составил 99.7%, а при 0.1 Ом – 97.7%. Если уменьшение КПД при увеличении R_{on} до 0.1 Ом вполне объяснимо из-за роста потерь мощности, то увеличение КПД при сопротивлении 0.01 Ом по сравнению со случаем 0.001 Ом на первый взгляд объяснить затруднительно.

Модель для исследования синхронного выпрямителя на полевых транзисторах приведена на рис. 9, а временные диаграммы сигналов – на рис. 10.

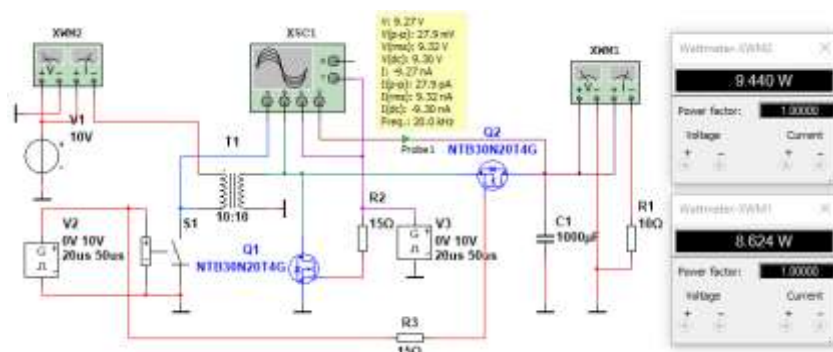


Рисунок 9 – Схема для исследования однополупериодного синхронного выпрямителя с емкостным фильтром, выполненного на полевых транзисторах

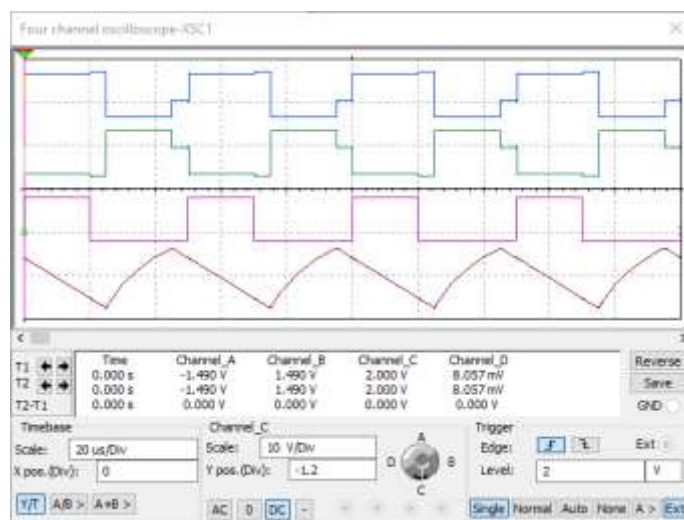


Рисунок 10 – Осциллограммы сигналов на входе/выходе трансформатора, входе управления ключа Q1 и на выходе выпрямителя (нижняя) для схемы, приведенной на рис. 9

В качестве ключей использованы полевые транзисторы NTB30N20T4G (Power MOSFET 200 В, 30 А, 81 мОм, N-канал). Для выбранного типа транзисторов КПД составил 91.4%.

Для оценки влияния параметров транзисторов синхронного выпрямителя на его КПД было проведено несколько экспериментов, результаты которых представлены в таблице. Параметры управляющих сигналов при этих экспериментах сохранялись неизменными кроме длительности фронтов управляющих сигналов, формируемых генераторами V2 и V3.

Таблица 1. Зависимость КПД синхронного выпрямителя от параметров транзисторов ключей

Тип транзистора	R_{on} , мОм	$I_{пр}$, А	$U_{обр. макс.}$, В	$P_{вых}$, Вт	КПД, %	
					$t_{\phi} = 1$ нс	$t_{\phi} = 25$ нс
NTB30N20T4G	81	30	200	8.624	91.4	93.8
ATP405-TL-H	33	40	100	8.57	92.4	91.8
BSO040N03MS G	4.9	20	30	8.930	95.8	94.5
BSZ018NE2LS	1.8	40	25	8.603	93.8	92.4
BSB017N03LX3 G	1.7	147	30	8.978	93.1	94.4
BSC010N04L	1.0	100	40	8.661	91.8	92.8

Результаты в табл. 1 расположены по уменьшению сопротивления открытого ключа. И если первые 3 строки подтверждают положение о том, что сопротивление открытого ключа определяет КПД [2], то последующие 3 строки это опровергают. С аналогичным случаем мы столкнулись при изменении сопротивления идеального ключа. Следовательно, этот вопрос требует дополнительного исследования.

При увеличении длительности фронтов управляющих сигналов изменение КПД происходит еще более странным образом. Для некоторых типов транзисторов он увеличивается (например, для BSB017N03LX3 G), а для других уменьшается.

Кроме того, сравнивая КПД синхронного выпрямителя на идеальных ключах и на полевых транзисторах видно, что при сопротивлении идеального ключа 100 мОм он имеет КПД выше, чем у самого лучшего выпрямителя на полевых транзисторах с сопротивлением открытого ключа 4.9 мОм – 97.7% против 95.8%, что также требует поиска других факторов, влияющих на КПД.

Известно, что потери мощности происходят в моменты переключения ключей, когда его сопротивление изменяется от минимального до максимального. Чем больше время переключения, тем большие потери мощности будут происходить на нем при прочих равных условиях. Однако сравнивая параметры транзисторов, приведенные в data sheet, это положение результаты эксперимента не подтверждают. Например, время переключения транзистора BSO040N03MS G составляет 18 нс, а транзистора BSZ018NE2LS – 4.8 нс, а КПД выше при использовании BSO040N03MS G.

Сравнение с лучшим результатом с диодами Шоттки (97.18%) противоречит общепринятому мнению что синхронный выпрямитель лучше, чем реализованный на диодах Шоттки. Даже лучший по КПД для синхронного выпрямителя на полевых транзисторах результат говорит не в его пользу.

Естественно предположить, что комбинация синхронного выпрямителя и диодов Шоттки может привести к увеличению КПД. Для проверки этого положения собрана модель, приведенная на рис. 11, в которой использованы элементы обеспечивающие наихудшие параметры для каждого типа выпрямителей, рассмотренные в данной статье.

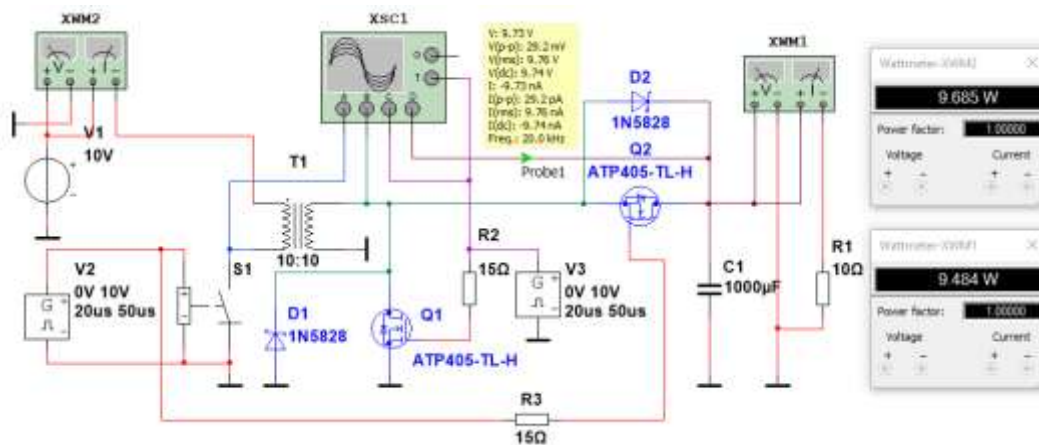


Рисунок 11 – Схема для исследования комбинированного синхронного выпрямителя

Полученный результат подтвердил высказанное предположение. КПД для схемы на рис. 11 составил 97.9%, что превышает наилучшие значения как для выпрямителей на диодах Шоттки, так и для синхронных выпрямителей на полевых транзисторах.

Дополнительные исследования зависимости КПД синхронного выпрямителя на идеальных ключах от сопротивления открытого ключа показали, что максимальное значение КПД получается при значении $R_{on} = 7.5 \text{ мОм}$ (рис. 12).

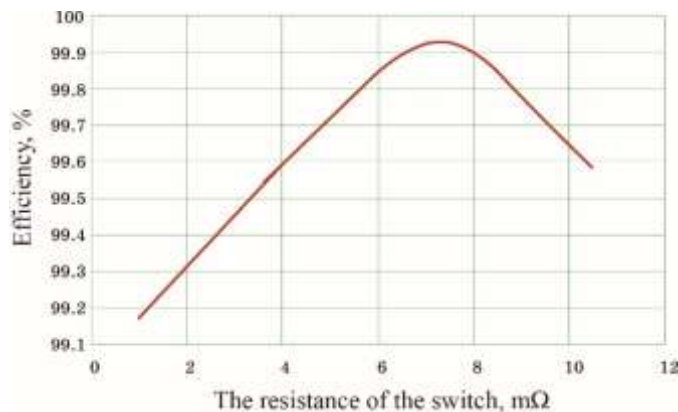


Рисунок 12 – Зависимость КПД выпрямителя от сопротивления открытого идеального ключа

Выводы

1. Проведенные эксперименты позволяют сделать вывод о том, что не всегда синхронный выпрямитель лучше, чем выпрямитель, выполненный на диодах Шоттки.

2. Для получения максимального КПД требуется тщательный подбор параметров сигналов управления ключами синхронного выпрямителя. При использовании диодов Шоттки формировать управляющие сигналы нет необходимости.

3. Использование синхронных выпрямителей на полевых транзисторах с подключенными параллельно им диодами Шоттки позволяет повысить КПД выпрямителя.

Список использованной литературы

1. Power Management Guide. <http://www.ti.com/lit/sg/slvt145p/slvt145p.pdf>
2. E. Faniani "To increase the efficiency of the Converter due to synchronous rectification", *Electronic components*, Moscow, – pp. 35-37, – April 2014.
3. M. Solomatin "Use of components from International Rectifier for synchronous rectification", *Electronic components*, Moscow, – pp. 12-20, – June 2010.

В.В. Макаренко, канд. техн. наук, старш. наук. співроб., доц.,

В.М. Співак, канд. техн. наук, доц.,

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

**АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ СИНХРОННИХ ВИПРЯМЛЯЧІВ В
ІМПУЛЬСНИХ ДЖЕРЕЛАХ ЖИВЛЕННЯ**

Ефективність використання синхронного випрямляча в перетворювачах змінного / постійного струму і постійного / постійного струму. Моделювання випрямлячів діода Шоттки, ідеальні клавiші і клавiші з використанням МДП-транзисторів. Результати експериментів не підтверджують безумовного переваги синхронних випрямлячів. Пропонується використання комбінованих схем випрямлячів для підвищення їх ефективності.

Ключові слова: випрямлячі; синхронні; діод Шоттки; МОП-транзистори; перетворювачі; симуляція, Multisim.

V. Makarenko, Cand. Sc. (Eng.), SRF, Assoc. Prof.

V. Spivak, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof.

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

**ANALYSIS OF THE EFFECTIVENESS OF THE USE OF SYNCHRONOUS RECTIFIERS IN
SWITCHING POWER SUPPLIES**

Efficiency of the use of synchronous rectifier in AC/DC and DC/DC converters. The simulation of the rectifiers diode Schottky, perfect keys and keys using MOS transistors. The results of the experiments do not confirm unconditional advantage of the synchronous rectifiers. Proposed the use of combined circuits of the rectifiers to increase their efficiency.

Key words: rectifiers; synchronous; diode Schottky; MOS transistors; converters; simulation, Multisim.

Надійшла 17.03.2017

Received 17.03.2017

ОЦІНКА ПОТЕНЦІАЛУ ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ В БЮДЖЕТНІЙ СФЕРІ НА ОСНОВІ РАНГОВОГО АНАЛІЗУ

В статті розглянуто, в якості апарату для моделювання енергоспоживання, класичні методи математичної статистики (нормальний закон розподілу) та ранговий аналіз, під яким розуміється метод дослідження техноценоз, що передбачає оптимізацію на основі критеріїв форми гіперболічних Н-розподілів.

Приведені процедури інтервального оцінювання, параметричного нормування, прогнозування та нормування споживання ресурсів. Представлено математичний апарат техноценологічного підходу.

Розроблено алгоритм проведення рангового аналізу для оптимізації техноценозу. Приведено ранговий параметричний розподіл техноценозу по споживанню електричної енергії бюджетними організаціями та установами Солом'янського району міста Києва за 2016 рік.

Ключові слова: енергетична ефективність, закон Циффа, техноценоз, ранговий аналіз, Н-розподіл.

Вступ. Енергозбереження відноситься до числа вищих пріоритетів державної енергетичної політики України, складаючи основу енергетичної стратегії до 2035 року. Підвищення енергоефективності збільшує рентабельність, конкурентоспроможність, кількість робочих місць, вивільняє кошти для розвитку бізнесу. В [1] передбачено, що до 2025 року здебільшого буде завершено реформування енергетичного комплексу України, досягнуто першочергових цільових показників з безпеки та енергоефективності, забезпечено його інноваційне оновлення та інтеграцію з енергетичним сектором ЄС. Рівень використання потенціалу енергозбереження в нашій державі є незадовільний, незважаючи на ряд прийнятих законодавчих та інших нормативно-правових актів, спрямованих на ефективне використання паливно-енергетичних ресурсів (ПЕР), зменшення обсягу їх споживання та імпорту. Основними причинами високої енергоемності ВВП та неефективності здійснення заходів з енергозбереження є [2, 3]:

- 1) недосконалість нормативно-правової бази у сфері енергоефективності та енергозбереження, відсутність окремих стандартів і нормативів;
- 2) надмірна зношеність основних фондів, низькі темпи їх оновлення, недостатній рівень мотивації власників підприємств щодо оновлення таких фондів за рахунок власних або кредитних коштів та відсутність у них відповідних зобов'язань;
- 3) недосконалість механізму утворення цін і тарифів на енергоносії, що призводить до перехресного субсидування;
- 4) наявність та подальше збільшення обсягу заборгованості з оплати спожитих паливно-енергетичних ресурсів;
- 5) значні понаднормативні втрати ресурсів, постачання яких здійснюється з використанням інженерних мереж;
- 6) недостатній рівень впровадження новітніх технологій, спрямованих на підвищення ефективності використання паливно-енергетичних ресурсів, альтернативних і відновлюваних джерел енергії;
- 7) відсутність цілісної інноваційної інфраструктури, необхідної для зниження енергоемності ВВП до рівня розвинутих держав світу;
- 8) обмежений доступ юридичних і фізичних осіб до кредитних ресурсів;
- 9) неефективність системи енергетичного менеджменту у виробничій та невиробничій сфері, відсутність відповідних автоматизованих систем;
- 10) недостатній рівень оснащення інженерних мереж приладами обліку паливно-енергетичних та інших ресурсів.

Десятиліття неефективного використання енергоресурсів створили в Україні величезний невикористаний потенціал енергозбереження, обумовлений як технологічними недосконалістю основних виробничих фондів, так і традиційним марнотратством енергоресурсів, погано налагодженими і не забезпеченими сучасними технічними засобами обліком і контролем використання палива і енергії.

Низький, у порівнянні з зарубіжними країнами, рівень енергоефективності економіки України призводить до високих затрат на енергозабезпечення, сприяє порушенню стійкого енергопостачання населення і економіки країни, ускладнює збереження енергетичної безпеки. Це і визначає особливу увагу економіки, енергоменеджменту до проблеми енергозбереження [4 – 7]. Проте слід зазначити, що в дослідженнях бракувало системності щодо впровадження єдиної ефективної системи енергозбереження з залученням процедур енергоаудитів. Особливо велике значення має раціональне використання енергії у

споживачів енергоресурсів, оскільки втрати енергії при її використанні, як правило, перевищують її втрати при виробництві і розподілі.

Надійним інструментарієм, що забезпечує цілі і завдання енергозбереження, є енергетичне обстеження (енергоаудит). Проведені енергоаудити дозволяють давати незалежну оцінку споживання енергоресурсів на об'єкті та проаналізувати ефективність витрачання електроенергії та інших видів паливно-енергетичних ресурсів [8, 9].

При описанні енергетичних процесів в енергетичній системі будемо використовувати наступні терміни [10, 11]:

1) Технічна енергетична система (ТЕС) – сукупність обладнання і підприємств, що взаємодіють один з одним для виробництва, споживання або перетворення, зберігання, транспортування або обробки енергопродукту.

2) Енергопродукт – готовий товар, який використовується, головним чином, для виробництва механічної роботи, теплової або хімічної енергії або фізичних процесів.

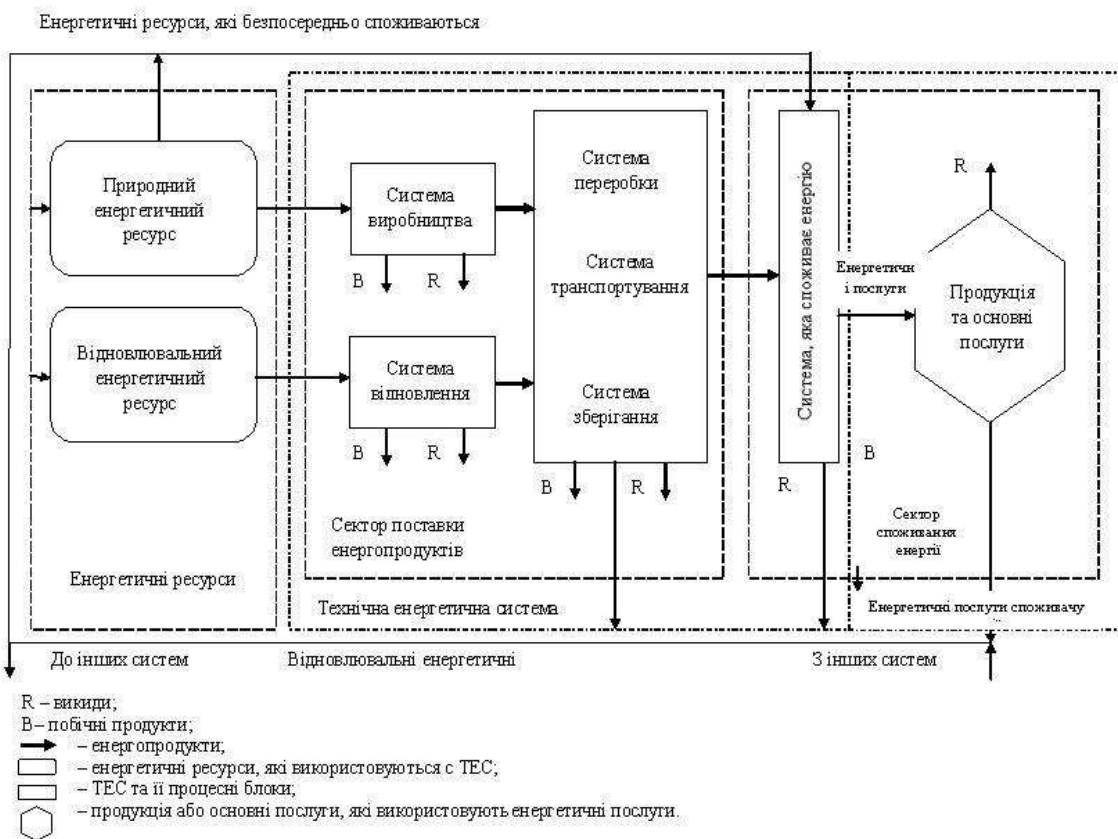


Рисунок 1 – Загальна модель технічної енергетичної системи

Природні ресурси використовуються як входи до ТЕС, тобто сукупність обладнання і підприємств, основними виходами яких є продукти і послуги, але які також виробляють побічні продукти. Природні ресурси у вигляді інших енергоносіїв, таких як сонячне випромінювання, енергія припливів, геотермальна енергія, вітер і тепло, також використовуються для прямого перетворення в механічну, теплову або електричну енергію.

Продукти, які є виходами технічної енергетичної системи, є входами в інші технічні енергетичні системи або використовуються для надання послуг. В кінці терміну їх експлуатації вони повторно використовуються всередині техносфери або надходять назад у природне середовище як викиди. Таким чином, входами в техносферу є природні ресурси, а виходами послуги, що надаються суспільству, викиди та експлуатаційні впливи [10, 11].

Вирішити задачі оптимізації управління енергетичною ефективністю можна за допомогою міжнародного стандарту ISO 50001: 2014 Energy management systems – Requirements with guidance for use (ДСТУ ISO 13600-2014 Системи енергетичного менеджменту. Вимоги та настанова щодо використання). Стандарт визначає вимоги для системи енергоменеджменту, що дозволяє впровадити системний підхід до безперервного покращення енергоефективності (energy efficiency) і енергопараметрів (energy performance). Стандарт застосовується до всіх типів організацій незалежно від їх розміру та галузевої належності, тому він не містить заздалегідь встановлених критеріїв енергоефективності [12, 13].

Енергетичний менеджмент – частина загальної системи управління підприємством (організацією), яка має чітку організаційну структуру і спрямована на отримання прибутку шляхом ефективного управління енергозбереженням. Енергетичний менеджмент являє собою менеджмент (управління) енергії як будь-якого іншого виробничого ресурсу з метою зменшення витрат шляхом поліпшення енергоефективності.

Система енергетичного менеджменту (СЕМ) – сукупність взаємопов'язаних або взаємодіючих елементів, яка використовується для встановлення енергетичної політики і цілей і застосування процесів і процедур для досягнення цих цілей.

Стандарт ISO 50001 розроблений і побудований на основі циклу безперервного поліпшення «Plan-Do-Check-Act» («Планувати - Виконувати - Перевіряти - Діяти») і включає енергоменеджмент в щоденну практичну діяльність організацій (рисунок 2) [13].



Рисунок 2 – Структурна схема системи енергетичного менеджменту в стандарті ISO 50001

Мета та завдання. Подання множини об'єктів підприємств, організацій та установ у вигляді технічної енергетичної системи визначає використовуваний рівень в загальній методології досліджень в галузі енергозбереження (рисунок 3). Перший рівень відповідає дослідженням, націленим на конкретні технічні та технологічні розробки, які сприяють зниженню електроспоживання.

На третьому рівні здійснюється стратегічне планування і прогнозування в електроенергетиці (оперативне диспетчерське управління, маневрування максимумами навантаження, регулювання потоків реактивної потужності, так зване оперативне енергозбереження тощо). Тут, на додаток до гаусової методології першого рівня, знаходить застосування методологія дослідження операцій, яка базується на евристичних і алгоритмічних процедурах [14, 15].

Другий рівень досліджень в галузі енергозбереження представляє досліджувану систему за допомогою універсальної моделі – техноценозу [16]. Автором цієї моделі, який протягом десятиліть впроваджував її в науковий обіг, є доктор технічних наук, професор Б.І. Кудрін.

Як методологічна основа на цьому рівні застосовується ранговий аналіз, під яким розуміється метод дослідження техноценоз, що передбачає подальшу його оптимізацію на основі критеріїв форми гіперболічних H -розподілів [15 – 17]. Саме цей рівень є ключовим в методології керування енергеоспоживання. З огляду на принципові концептуальні та методологічні відмінності, що лежать в основі досліджень на другому рівні, він розглядається як системний по відношенню до рівня досліджень, до яких відносяться конкретні технічні і технологічні рішення в галузі енергозбереження [18].

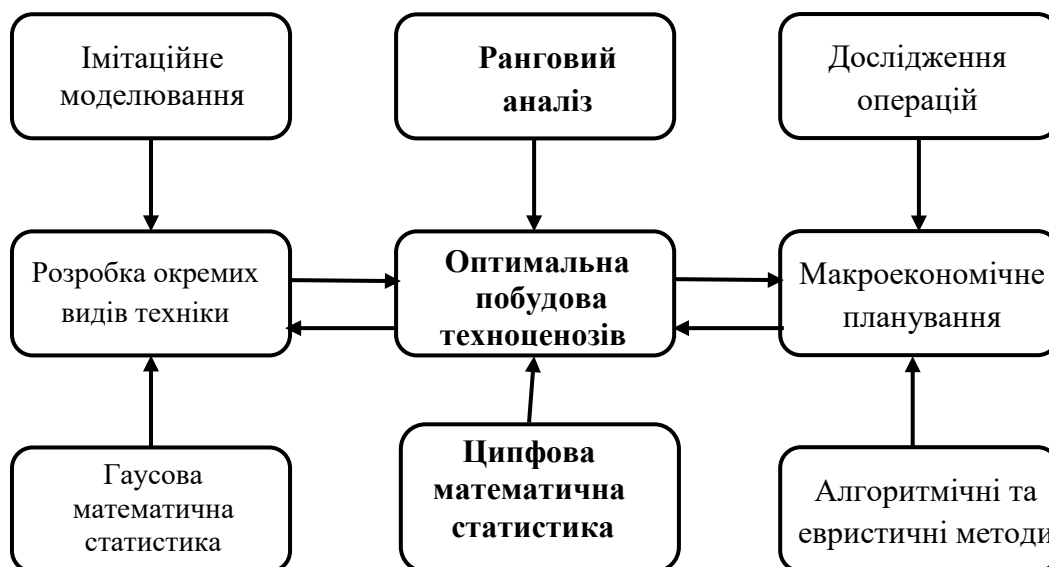


Рисунок 3 – Рівні дослідження в галузі енергозбереження

В якості апарату для моделювання енергоспоживання використовуються класичні методи математичної статистики або техноценологічні методи.

Найбільш поширені статистичні методи дослідження, що ґрунтуються на екстраполяції часових рядів, аналізі статистичних характеристик нормального закону розподілу, застосуванні регресійного аналізу. Перевагою даних методів є відносна простота отримання вихідних даних. Однак збільшення кількості вхідних змінних значно ускладнює обробку даних, вимагає розрахунку показників, нормативних коефіцієнтів, визначення статистичних закономірностей. Це призводить до появи похибок і негативно впливає на точність розрахунку питомих витрат енергоспоживання.

Класичні методи [19, 20] що ґрунтуються на гаусовій математичній статистиці, припускають нормальний розподіл параметрів об'єкта і перерахунок енергоспоживання на основі ідеального аналога в модельному технологічному процесі. Визначення потенціалу енергозбереження однакових за складом і працюючих в різних умовах об'єктів призводить до різних оцінок, що враховує їх специфіку, але не дозволяє коректно оцінити цю величину в цілому.

Останнім часом інтерес до вивчення негаусових систем помітно виріс. Стало очевидним, що в більшості організаційних, економічних, біологічних, технічних та інших складних систем присутній гіперболічний закон розподілу. Найчастіше він носить назву закону Ципфа, проте в залежності від галузі варіанти його назви варіюються. Так, будучи виявленим в наукометрії, він був названий законом Бредфорда (розподіл вчених за продуктивністю); в бібліометрії – законом Лотке; в економіці - законом Парето (нерівномірність розподілу матеріальних благ в суспільстві); в соціальній географії - законом Ауербаха (нерівномірність розподілу міст за чисельністю населення); законом Кудріна [16], який демонструє Н-розподілу в технетиці.

Для оптимального управління енергоспоживанням техноценозу використовується ранговий аналіз. Він включає процедури інтервального оцінювання, параметричного нормування, прогнозування та нормування споживання ресурсів. Поглиблене вивчення рангових параметричних розподілів дає можливість значно підвищити ефективність рангового аналізу. Він здійснюється в таких процедурах як: дифлекс-аналіз (виконується на етапі інтервального оцінювання), GZ-аналіз (виконується на етапі прогнозування) і ASR-аналіз (проводиться на етапі нормування). Поглиблений варіант GZ-аналізу уможливує ще до початку процедури прогнозування виконати вибір G- методології або Z-методології, це в свою чергу суттєво прискорює розрахунки і підвищує їх точність (позитивний ефект від використання даного аналізу пропорційний розмірам досліджуваної бази даних) [15, 21].

Для прогнозування електроспоживання об'єктів G-методами в основному використовуються моделі авторегресійного змінного середнього, декомпозиції часового ряду, а також різні варіації методів на основі аналізу сингулярного спектру траєкторної матриці часового ряду. В процесі прогнозування електроспоживання техноценоз Z-методами повинні враховуватися техноценологічні властивості, які зводяться до поняття стійкості гіперболічних рангових параметричних розподілів.

Техноценоз завжди складається з технічних виробів, об'єднаних в просторово-технологічні кластери. Просторово-технологічний кластер – об'єкт, підсистема техноценозу, взаємопов'язана,

відмежована і яка володіє цілісністю з точки зору спільності управління, технології, території, споживання ресурсів тощо.

Гаусовий ресурс кластеру рівний:

$$W_G = \left(\int_{r_1}^{r_2} W^g(r) dr - ((r_1 - r_2) \cdot W_2) \right), \quad (1)$$

де $W(r)$ – ранговий параметричний розподіл техноценозу по електроспоживанню, $W^g(r)$ – гаусовий розподіл, який відповідає кластерному розподілу параметрів в ранговій диференційній формі, W_2 – значення електроспоживання, яке відповідає правій ранговій границі кластеру r_2 .

Системний ресурс кластеру визначається наступним чином:

$$W_Z = \int_{r_1}^{r_2} (W(r) - W^g(r)) dr, \quad (2)$$

Процедура кластеризації рангових параметричних розподілів по досліджуваному параметру істотно ускладнена через негаусовість розподілів, що невідворотно веде до негаусових кластерів. При цьому порушується головний мінімаксий критерій кластер аналізу (те, що статистично всередині кластера функціональні параметри об'єктів повинні розподілятися по нормальному закону). Вихід із цього становища можливий в результаті збільшення кількості кластерів, при цьому системний і гаусовий ресурси кластерів зводяться відповідно до системного і гаусового довірчого інтервалу об'єктів і рангів.

Подальший глибший GZ – аналіз техноценозу полягає у визначенні так званого кумулятивного когерент фактору, який дорівнює відношенню сумарного системного довірчого інтервалу всіх об'єктів техноценозу до відповідного сумарному гаусового довірчого інтервалу [15, 22, 23]:

$$K_{\Sigma} = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta W_{Z_i}}{\sum_{i=1}^n \Delta W_{G_i}}, \quad (3)$$

де n – кількість об'єктів техноценозу.

Когерент фактор техноценозу показує в якій степені його системна поведінка узгоджена з індивідуальною поведінкою окремих об'єктів (під поведінкою розуміються властивості параметричних часових рядів об'єктів і техноценозу). Потім можна отримати динамічні когерент функції [23]:

$$\begin{cases} K_{\Sigma}(t); \\ K_{GZ_i}(t); \\ i = 1 \dots n, \end{cases} \quad (4)$$

де t – час функціонування техноценозу.

Когерент функції дозволяють оцінювати в будь-який момент часу і прогнозувати зміну в майбутньому динамічних властивостей як техноценозу в цілому, так і його об'єктів окремо.

Критеріальний варіант GZ-аналізу дозволяє ще до початку власне процедури прогнозування здійснити вибір G- або Z- методу, що істотно прискорює розрахунки і підвищує їх точність (позитивний ефект пропорційний розмірам бази даних). Як впливає з закону оптимальної побудови техноценозів, як критерій вибору методу слід розглядати співвідношення обсягів системного і гаусового ресурсів кластерів техноценозу [22, 23].

Як показано в роботах [21 – 23], похибка прогнозування електроспоживання із застосуванням процедур критеріального GZ-аналізу для окремих об'єктів може скласти 4 – 10%. При цьому похибка прогнозу для техноценозу в цілому, як правило, не перевищує 1,5 – 2% [24].

Техноценологічні методи [14 – 18, 21 – 25] гуртуються на цифровій математичній статистиці і теорії гіперболічних безмежно подільних H -розподілів. При цьому об'єкти утворюють систему особливого типу – техноценоз. – обмежену в просторі і часі взаємопов'язану сукупність функціонально закінчених

технічних виробів, об'єднаних слабкими зв'язками. Зв'язки носять особливий характер, зумовлений технологічною незалежністю і різноманіттям вирішуваних завдань.

У роботах [15, 16, 23, 25] під техноценоз розуміється обмежена в просторі і часі з собою сукупність далі неподільних технічних виробів-особин, об'єднаних слабкими зв'язками. Зв'язки в техноценоз носять особливий характер, який визначається конструктивною, а часто і технологічною незалежністю окремих технічних виробів і різноманіттям вирішуваних завдань. Взаємопов'язаність техноценоз визначається єдністю кінцевої мети, що досягається за допомогою загальних систем керування і забезпечення. Тут здійснюється оптимізація електроспоживання техноценоз в цілому.

Математично негаусовий розподіл виражається спадаючою степенною залежністю. Такий характер дискретного розподілу називають законом Ципфа (Zipf), який знайшов його прояв в лінгвістиці [26].

Закон Ципфа – добуток ранга на частоту (численність популяції) є величина постійна:

$$b = r\lambda(r), \quad (5)$$

r – ранг, найбільшій по численності популяції присвоюється перший ранг $r = 1$ і далі по спадаючій; $\lambda(r)$ – число особин будь-якого виду (численність популяції)

Мандельброт (Mandelbrot) дещо модифікував формулу Ципфа:

$$\lambda(r) = \frac{b}{r^\beta}, \quad (6)$$

β – показник, який визначає ступінь крутизни кривої розподілу [25].

Техноценоз взагалі не ділиться на частини, а утворюється неподільними елементами, кожен з яких виконує одиничну кількість функцій, і ці функції слабо визначаються іншими (існує статистична незначимість зв'язків і взаємодій). Для ценоза відсутні (непридатні) ключові поняття теорії систем: вхід, вихід, зворотний зв'язок, коли, наприклад, технологічні процеси і агрегати представляються як множинні об'єкти управління, для яких характерне використання декількох регулюючих впливів для підтримання необхідного значення однієї вихідної змінної.

Математичний апарат ценологічного методу представлений трьома моделями гіперболічного H – розподілу [15, 16]:

1) Видовий:

$$\Omega(x) = \frac{W_0}{x^{1+\alpha}}, \quad (7)$$

де $x \in [1, \infty)$ – безперервний аналог чисельності популяції i (i – завжди дискретна величина, $i = [x]$); $\alpha > 0$ – характеристичний показник; постійна розподілу $\gamma = 1 + \alpha$; $W_0 = AS$, $W_1 = [W_0]$, де W_0 – теоретичне, не обов'язково дискретне значення, і W_1 – фактичне (експериментальне) значення першої точки; A – постійна розподілу, яку знаходять з умов нормування.

2) Ранговий:

$$\Lambda(x) = \frac{B}{r^\beta}, \quad \omega(r) = \frac{u_r}{U}, \quad U = \sum_{r=1}^S u_r, \quad (8)$$

де u_r – кількість особин виду s_r (чисельність популяції s_r виду), яка відповідає рангу r при загальній кількості особин U . Ранг виду $s = 1, 2, \dots, s_r, \dots, S$ – це його порядковий номер (номер рядка). $1 > B > 0, \beta > 0$ – константи рангового H -розподілу.

3) Ранговий по параметру:

$$W(x) = \frac{W_1}{r^\beta} \quad (9)$$

де r – ранг об'єкту; β – показник, який визначає ступінь крутизни кривої розподілу; $W_1 = W_{\max}(x)$ – константа, за яку приймається максимальне значення енергоспоживання найбільш крупного споживача.

Рангове розподіл по параметру дозволяє говорити про оптимальність, ефективність ценоза в цілому. Далі необхідно дослідити структуру ценозу [15].

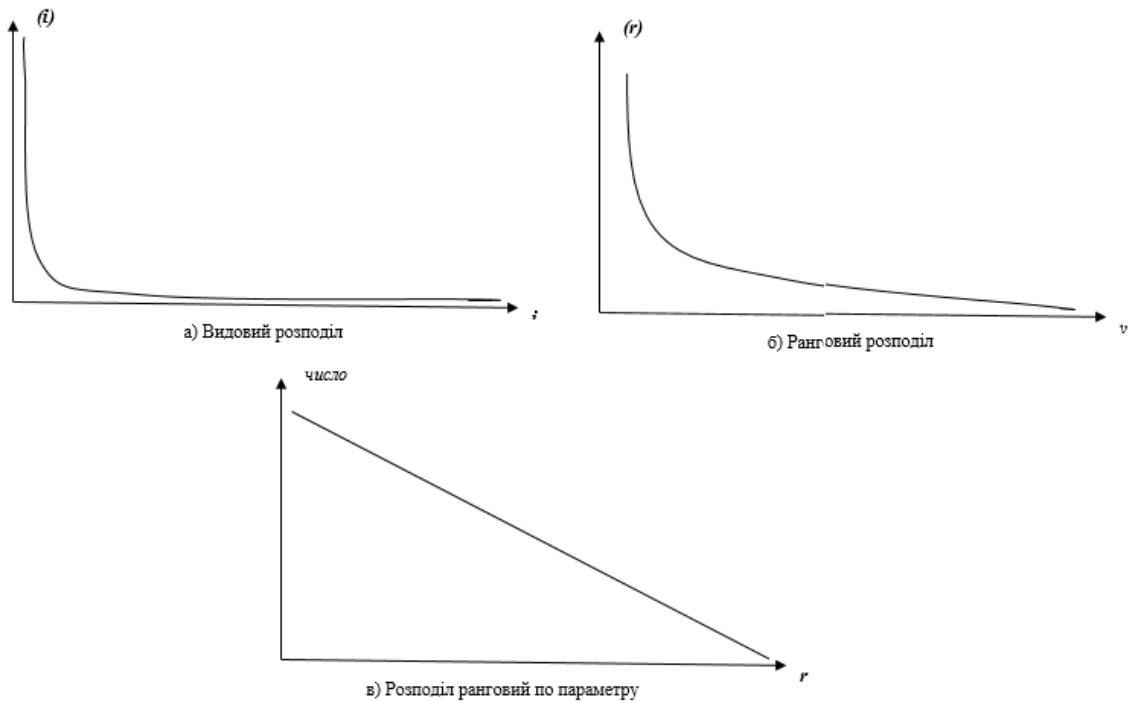


Рисунок 4 – Види H – розподілів

На рисунку 4 представлені видовий (рис. 4, а) і ранговий (рис. 4, б) H – розподіли і H – розподіл по параметру (рис. 4, в), що служить не для дослідження структури, а для системного опису ценозу.

На етапі попереднього аналізу здійснюється збір даних про споживачів електроенергії з метою отримання розгорнутої картини електроспоживання (з історією на глибину 5 – 6 років і більше, а також деталізацією по годинах, добі, місяцях, кварталах і роках). Це дозволяє виявити об'єкти, які забезпечуються електроенергією з порушенням існуючих організаційно-технічних вимог, підготувати електронну базу даних для багатофакторного аналізу.

Матеріали та результати досліджень. Ранговий аналіз ніколи не закінчується апроксимацією відповідних розподілів техноценозу. За ним завжди слідує оптимізація, тому що нашим головним завданням є визначення напрямів і критеріїв поліпшення існуючого техноценозу. Процедура оптимізації будь-якого ценозу спрямована на усунення аномальних відхилень на ранговому розподілі. Після виявлення аномалій на графічному розподілі по табульованому розподілу визначаються особини, «відповідальні» за аномалії, і намічаються першочергові заходи щодо їх усунення.

Алгоритм проведення рангового аналізу для оптимізації техноценозу включає наступні етапи:

1. Виділення ценозу.

Виділення техноценозу супроводжується його описом. Для цього задають спеціальну базу даних, що включає систематизовану і стандартизовану, досить повну і в той же час без зайвих подробиць інформацію по видах і особинах техноценозу.

2. Завдання видоутворюючих параметрів.

Елементи техноценозу виділяються на основі бази даних. Для кожного елемента повинна бути певна документація в базі даних. Якщо розглядати випадок з бюджетними організаціями та установами, то в базі даних повинні знаходитися дані про щомісячне споживання енергоресурсів.

3. Рангово – параметричний опис ценозу.

Перший ранг присвоюється об'єкту з найбільшим споживання енергетичних ресурсів, далі за зменшенням енергоспоживання.

4. Побудова табульованого рангового розподілу та графічного рангового параметричного розподілу існуючого техноценозу.

5. Розрахунок ступеня крутизни кривої гіперболічного H -розподілу. Апроксимація розподілів.

6. Оптимізація ценозу.

Після проведення даного аналізу можна приступати до прогнозування енергоспоживання на основі техноценологічного підходу. Блок-схема алгоритму проведення рангового аналізу для оптимізації техноценозу представлена на рисунку 6.

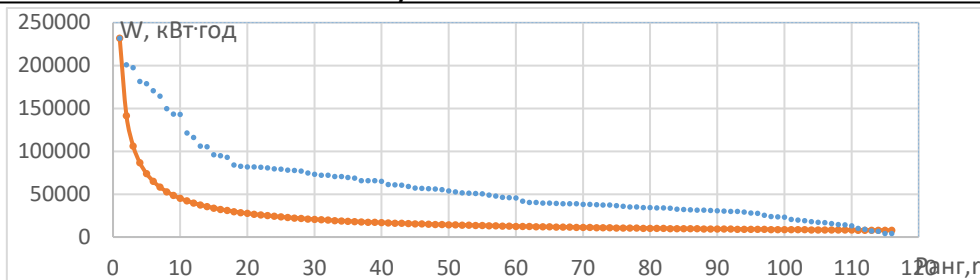


Рисунок 5 – Ранговий параметричний розподіл техноценозу по споживанню електричної енергії бюджетними організаціями та установами Солом’янського району міста Києва за 2016 рік, точки – емпіричні дані, суцільна лінія – апроксимальна крива.

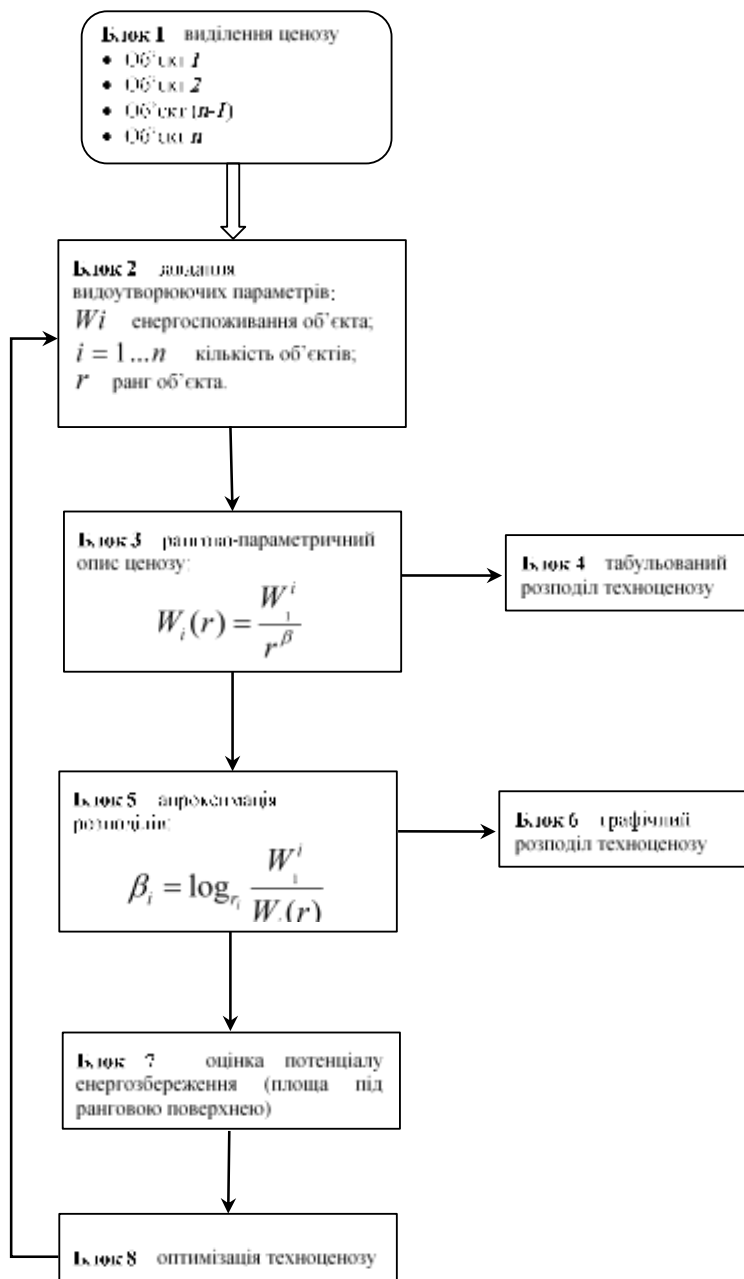


Рисунок 6 – Блок-схема алгоритму проведення рангового аналізу для оптимізації техноценозу

Дослідження ценозів як цілісності зводять до їх системного опису ієрархічною системою показників (що обов'язково для ідентифікації ценоза) і до структурного ценологічного опису. У даній роботі

пропонується в якості особин представити бюджетні організації та установи Солом'янського району м. Києва. Кожна особина має своє значення електроспоживання. Даний ценз обмежений в просторі – загальна кількість включає в себе багато функціонально відокремлених особин, не пов'язаних один з одним сильними зв'язками. Також існує єдина інфраструктура, що включає в себе систему електропостачання, а також систему контролю експлуатації та забезпечення функціонування.

Енергоспоживання об'єкта описується аналітичною залежністю:

$$W(x) = \frac{W_1}{r^\beta} = \frac{231854}{r^{0,711}} \Rightarrow \beta = 0,711$$

Найкращим вважається такий стан техноценозу, при якому параметр знаходиться в межах $0,5 \leq \beta \leq 1,5$. Відповідно до зазначеного виразу можна визначити деякий діапазон оптимальних станів системи і графічно відобразити його у вигляді якоїсь смуги на графіку рангового розподілу (рисунок 5).

З рисунку 5 видно, що споживання електричної енергії бюджетними організаціями та установами Солом'янського району досить не оптимальне і потребує значного покращення. Параметр H -розподілу β входить в діапазон $0,5 \leq \beta \leq 1,5$, однак крива споживання енергетичних ресурсів значно віддалена від оптимальної апроксимальної кривої, що свідчить про недостатню ефективність роботи системи в цілому. При наявності відхилення необхідна додаткова робота з техноценозом: номенклатурна оптимізація; цілеспрямоване видалення аномальних особин; параметрична оптимізація; покращення параметрів аномальних особин тощо.

Висновки. Основним змістом рангового аналізу вважається методика побудови рангових розподілів і їх подальше використання з метою оптимізації ценоза. Для виконання оптимізації системи виконується порівняння ідеальної кривої з реальною, після вивчення співвідношення кривих можна зробити висновок: що необхідно змінити в ценозі, щоб точки реальної кривої прагнули потрапити на ідеальну криву. Для цього визначаються способи, засоби, механізми поліпшення ценозу з метою усунення аномальних відхилень. При наближенні експериментальної кривої розподілу до ідеальної кривої виду, тим стабільніше система.

Перевагою техноценологічного методу та проведення рангового аналізу є оптимальне відображення процесу функціонування об'єктів техноценозу в майбутньому з урахуванням можливих змін технології, інфраструктури, а також використання ресурсів. При використанні методу облік факторів виконується, спочатку введенням в алгоритм моделі управляючих впливів, далі, реалізацією стохастичних зворотних зв'язків, і як наслідок одночасною розробкою кількох можливих варіантів розвитку техноценозу, а в подальшому при роботі з моделлю, постійним дослідженням адекватності результатів моделювання.

Недоліком слід зазначити, що метод, який заснований на статистичній моделі, як і подібні методи, з високою точністю розраховують значення короткострокового прогнозування (згідно з дослідженнями точний прогноз можна отримати на 1 – 2 роки, після цього помилка різко зростає). Другим недоліком є неможливість реалізації критеріїв, які засновані на порівнянні варіантів управління енергоспоживання. Ці недоліки можливо усунути. Для цього необхідне створення динамічної адаптивної моделі, що відбиває процес електроспоживання на глибину від 5 до 7 років і більше.

Список використаної літератури:

1. «Нова Енергетична стратегія України до 2035 року: безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність» Режим доступу: <http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/docscatalog/document?id=245213112>
2. «Державна цільова економічна програма енергоефективності на 2010-2015 роки» № 1446 – редакція від 19.11.2008. Режим доступу: <http://www.kmu.gov.ua/control/uk/cardnpd?docid=172230399>
3. І. Мазур. Енергоемність валового внутрішнього продукту України: передумови зниження. / І. Мазур // Вістник ТНЕУ. – 2012. – №1. – С. 64 – 72.
4. Праховник А.В. Енергозбереження - нетрадиційний погляд та інша стратегія / А. В. Праховник // Енергетика та електрифікація. - 2008. - № 4. - С. 30-32.
5. Жовтянський В.А. Енергозбереження в Україні: здобутки, проблеми, перспективи виробництва альтернативних видів палива плазмовими методами / В. А. Жовтянський // Ринок інсталяційний. - 2007. - № 11. – С. 8 – 11.
6. Ковалко М. П., Денисюк С. П. Енергозбереження – пріоритетний напрямок державної політики України. К., 1998
7. Стратегія енергозбереження в Україні: Аналітично-довідкові матеріали Колективна монографія в 2 т. за ред. В.А. Жовтянського, М.М. Кулика, Б.С. Стогнія. – Т.1: Загальні засади енергозбереження. – К.:

Академперіодика, 2006. – 510 с.; Т. 2: Механізми реалізації політики енергозбереження. – К.: Академперіодика, 2006. – 600 с.

8. Кошарная Ю.В. Использование методов ценологического и кластерного анализа в энергоаудите промышленных предприятий / Труды VII-ой Международной научно-практической Интернет-конференции «Энерго- и ресурсосбережение XXI век» (МИК-2009). Орел. 2009.

9. Ажнакін С. Г. Проблеми енергозбереження та енергоефективності діяльності електроенергетичних підприємств / С. Г. Ажнакін // Економічні інновації. – 2013. – Вип. 55. – С. 9 – 22. – Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/ecinn_2013_55_3.

10. ДСТУ ISO 13600-2001 Системи енергетичні технічні. Основні положення (ISO 13600:1997, IDT).

11. ДСТУ ISO 13601-2001. Системи енергетичні технічні. Структура для аналізу. Сектори постачання та споживання енергопродукту (ISO 13601:1998, IDT).

12. Степанов, В.С., Степанова, Т.Б.. Определение эффективности использования энергии в транспортных системах на основе энергетического и эксергетического КПД (на примере трубопроводного транспорта) // Научный журнал Братского государственного университета. – Братск. БрГУ, 2010, №8 – С. 126 – 132.

13. ДСТУ ISO 13600-2014 Системи енергетичного менеджменту. Вимоги та настанова щодо використання (ISO 50001:2011, IDT)

14. Гнатюк, В.И., Пантелеев В.И., Заименко А.А. Потенширование в методике оптимального управления электропотреблением техноценоза// Журнал Сибирского Федерального университета. Инженерия и технологии Ч.1, 2014. – С. 116 – 124.

15. Гнатюк, В.И. Закон оптимального построения техноценозов [Монография] / В.И. Гнатюк. – 2-е изд., перераб. и доп. – Электронные текстовые данные. – Калининград: [Изд-во КИЦ «Техноценоз»], [2014]. – Режим доступа: <http://gnatukvi.ru/ind.html>

16. Кудрин, Б.И. Введение в технетику / Б.И. Кудрин. – Томск: Томск. гос. ун-т, 1993. – 552 с.

17. Гнатюк, В.И., Лагуткин О.Е. Ранговый анализ техноценозов. – Калининград: БНЦ РАЕН – КВИ ФПС России, 2000. – 86 с.

18. Гнатюк, В.И. Потенциал энергосбережения техноценоза: трактат: интернет-ресурс. – Калининград: КИЦ «Техноценоз», 2013. – 56 с. – Адрес доступа: http://gnatukvi.ru/index_files/potential.pdf.

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

20. Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика: учеб. пособие для бакалавров / В. Е. Гмурман. - 12-е изд. - М. : Юрайт, 2013.

21. Гнатюк В.И. Тонкие процедуры рангового анализа по электропотреблению. Электрика. – № 12. 2007.

22. В.И. Гнатюк, Д.В. Луценко. Прогнозирование электропотребления регионального электротехнического комплекса на инерционном этапе развития. – М.: Изд-во ИИП РАН, 2009 – 92 с.

23. Кудрин Б.И. Электроснабжение промышленных предприятий: учебник для студентов высших учебных заведений. – М.: Интернет инжиниринг, 2005. – 672 с.

24. Гнатюк В.И. Прогнозирование электропотребления на основе GZ-анализа / Гнатюк В.И. // Энергоресурсосбережение и энергоэффективность. – 2009. – № 1(25). – С. 21– 28. – Режим доступа: http://www.endf.ru/25_1.php. Источник: http://stroymnogo.com/science/economy/classification_of_forecasts/

25. Б.И. Кудрин. Математика ценозов: видовое, ранговое, ранговое по параметру гиперболические Н-распределения и законы Лотки, Ципфа, Парето, Мандельборта.

26. Zipf G.K. Human Behaviour and the Principle of Least Effort. Cambridge, Mass., 1949.

27. Денисюк С. П. Оптимальне керування енергоспоживанням бюджетних організацій та установ як об'єктів техноценозу [Текст] / С. П. Денисюк, В. І. Василенко // Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. Серія Технічні науки. – 2017. – № 5 (114). – С. 97 – 105.

V. Vasilenko

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

ESTIMATION OF POTENTIAL OF ENERGY SAVING

IN THE BUDGET SPHERE BASED ON THE RANGE ANALYSIS

The article outlines the issues of increasing energy efficiency and energy security of Ukraine, presents the technical energy system, and considers the problems of optimization of energy efficiency management.

The research levels in the field of energy saving are presented and analyzed. The methods of mathematical statistics and technocenological methods of energy consumption modeling are presented.

A normal distribution law (often called the Gauss law) and rank analysis, which is understood as the method of research technocenosis, involves optimization based on the criteria of the form of hyperbolic H-distributions, is considered. The procedures of interval estimation, parametric rationing, forecasting and standardization of consumption of resources are resulted. Rank analysis is presented in procedures such as: difflex analysis (performed at the interval evaluation interval), GZ-analysis (performed at the stage of forecasting) and ASR-analysis (carried out at the stage of valuation).

The mathematical apparatus of the technocenological approach is represented by three models of hyperbolic H distribution: sighting, ranked and ranked by parameter.

The algorithm of the rank analysis for the forecast of power consumption is developed. The procedure of technocenological optimization is described. Studies of cenoses are reduced to their systematic description of the hierarchical system of indicators (which is necessary for the identification of the cenosis) and to the structural cenological description. The paper presents the ranked parametric distribution of technocenoses for the consumption of electric energy by budgetary organizations and institutions of Solomyansky district of Kyiv in 2016, and the analytical dependence of this technocenose for the subsequent optimization procedure on the parameter of electric power consumption is calculated.

Key words: energy efficiency, energy audit, Zipf law technocenosis, rank analysis, N-distribution.

References:

1. "The New Energy Strategy of Ukraine until 2035: Security, Energy Efficiency, Competitiveness" Access mode: <http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/doccatalog/document?id=245213112>
2. "State Target Economic Program for Energy Efficiency for 2010-2015" No. 1446 - version dated November 19, 2008. Access mode: <http://www.kmu.gov.ua/control/uk/cardnpd?docid=172230399>
3. I. Mazur. Energy intensity of gross domestic product of Ukraine: conditions of decline. / I. Mazur // The TNEU. – 2012. – Vol. 1. – pp. 64 – 72.
4. Prakhovnik A.V. Energy saving - an unconventional view and another strategy / AV Prakhovnik // Power engineering and electrification. – 2008. – Vol. 4. – pp. 30 – 32.
5. V.A. Zhovtyansky Energy Saving in Ukraine: Achievements, Problems, Prospects for Production of Alternative Fuels by Plasma Methods / VA Zhovtyansky // Market installation. – 2007. – Vol. 11. – pp. 8 – 11.
6. M.P. Kovalko, S.P. Denisyuk. Energy saving is a priority direction of the state policy of Ukraine. K., 1998.
7. Strategy of energy saving in Ukraine: Analytical and reference materials Collective monograph in 2 t. For ed. VA Zhovtyansky, MM Kulik, B.S. Stogniya – T.1: General principles of energy saving. – K.: Akadempriodika, 2006
8. Kosharna Yu.V. Using the methods of cenologic and cluster analysis in the energy audit of industrial enterprises / Proceedings of the VII International Scientific and Practical Internet Conference "Energy and Resource Saving XXI Century" (MIC-2009). Eagle. 2009
9. Ajnakin S.G. Problems of energy saving and energy efficiency of electric power enterprises / S.G.Azhnakin // Economic innovations. - 2013. – Issue 55. – pp. 9 – 22. – Access mode: http://nbuv.gov.ua/UJRN/ecinn_2013_55_3.
10. DSTU ISO 13600-2001 Power engineering systems. Basic provisions (ISO 13600: 1997, IDT).
11. DSTU ISO 13601-2001. Power engineering systems. Structure for analysis. Energy Supply and Consumption Sectors (ISO 13601: 1998, IDT).
12. V.S. Stepanov, T.B. Stepanov. Determination of efficiency of energy use in transport systems on the basis of energy and exergy efficiency (on the example of pipeline transport) // Scientific journal of the Bratsky state university . 2010, Vol. 8 – pp. 126 – 132.
13. DSTU ISO 13600-2014 Energy Management Systems. Requirements and usage guidelines (ISO 50001: 2011, IDT).
14. V.I. Gnatyuk, V.I. Pantelee, A.A. Zaimenko. Potentiation in the technique of optimal management of power consumption of technocenose // Journal of the Siberian Federal University. Engineering and Technologies, Ch.1, 2014. – pp. 116 – 124.
15. V.I. Gnatyuk, The Law of Optimal Construction of Technocenoses [Monograph] / VI Gnatyuk - 2nd ed., Pererab. and add - Electronic text data. - Kaliningrad: [Publishing Center "TechnocenoZ"], [2014]. – Access mode: <http://gnatukvi.ru/ind.html>
16. B.I. Kudrin/ Introduction to the Technetium / B.I. Kudrin - Tomsk: Tomsk. state un-t, 1993. – 552 pp.
17. V.I. Gnatyuk, O.E. Lagutkin. Rank analysis of technocenoses. – Kaliningrad: BNC RAN – KVI FPS of Russia, 2000. – 86 p.
18. V.I. Gnatyuk. The potential of energy saving technocenose: treatise: Internet resource. - Kaliningrad: Technical Center "TechnocenoZ", 2013. – 56 p. - Access address: <http://gnatukvi.ru/index.files/potential.pdf>.

19. E.S. Ventzel. Probability Theory: Textbook. for high schools. – 6th ed. rub – М.: Vyssh. Shk., 1999. – 576 p.
20. V.E. Gmurman. Theory of probability and mathematical statistics: study. Benefit for Bachelors / V. E. Gmurman. – 12th ed. – М.: Yuraight, 2013.
21. V.I. Gnatyuk. Thin ranked analysis procedures for power consumption. Electricity – Vol. 12. 2007.
22. V.I. Gnatyuk, D.V. Lutsenko Forecasting of electric power consumption of the regional electrotechnical complex at the inertial stage of development. - Moscow: Publishing House of the Russian Academy of Sciences, 2009 – 92 p.
23. B.I. Kudrin. Power supply for industrial enterprises: a textbook for students of higher educational institutions. - Moscow: Internet engineering, 2005. – 672 p.
24. V.I. Gnatyuk. Forecasting of power consumption on the basis of GZ-analysis / Gnatyuk V.I. // Energy resource saving and energy efficiency. – 2009. – Vol. 1 (25). – pp. 21 – 28. - Access mode: http://www.endf.ru/25_1.php. Source: http://stroyrnogo.com/science/economy/classification_of_forecasts/
25. B.I. Kudrin. Mathematics of cenozes: species, rank, rank hyper parametric H-distributions and the laws of Lotka, Zipfa, Pareto, Mandelblot.
26. Zipf G.K. Human Behaviour and the Principle of Least Effort. Cambridge, Mass., 1949.
27. S.P. Denisyuk Optimal management of energy consumption of budget organizations and institutions as objects of technocenosis [Text] / S.P. Denisyuk, V.I. Vasilenko // Bulletin of the Kiev National University of Technology and Design. Series Technical Sciences. – 2017 – Vol. 5 (114). – pp. 97 – 105.

УДК 621.3

В.И. Василенко

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

**ОЦЕНКА ПОТЕНЦИАЛА ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ
В БЮДЖЕТНОЙ СФЕРЕ НА ОСНОВЕ РАНГОВОГО АНАЛИЗА**

В статье рассмотрены, в качестве аппарата для моделирования энергопотребления, классические методы математической статистики (нормальный закон распределения) и ранговый анализ, под которым понимается метод исследования техноценоз, что предусматривает оптимизацию на основе критериев формы гиперболических H-распределений.

Приведены процедуры интервального оценивания, параметрического нормирования, прогнозирования и нормирования потребления ресурсов. Представлены математический аппарат техноценологического подхода.

Разработан алгоритм проведения рангового анализа для оптимизации техноценоза. Приведено ранговое параметрическое распределение техноценоза по потреблению электрической энергии бюджетными организациями и учреждениями Соломенского района города Киева за 2016 год.

Ключевые слова: энергетическая эффективность, закон Ципфа, техноценоз, ранговый анализ, H-распределение.

Надійшла 08.12.2017

Received 08.12.2017

SMART GRID СИСТЕМИ ТА ТЕХНОЛОГІЇ SMART GRID SYSTEM AND TECHNOLOGY

УДК 621.317

О.М. Мороз, д-р техн. наук, проф.
М.М. Черемісін, канд.техн.наук, проф
О.А. Савченко, канд.техн.наук, доц
С.А. Попадченко, магістр
С.В. Дюбко, магістр

Харківський національний технічний університет сільського господарства імені Петра Василенка

ВИКОРИСТАННЯ ТЕХНОЛОГІЙ SMART GRID ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ СПОЖИВАЧІВ

В статті розглядається питання використання технологій Smart Grid для підвищення надійності електропостачання споживачів. Розглянуті основні проблеми, які існують на даний час в електроенергетичній галузі. Досліджено ефективність впровадження автоматизованої системи контролю аварійних режимів повітряних ліній з врахуванням метеопараметрів та зроблений аналіз основних можливостей даної системи. Запропоновано модель прогнозування ожеледно-паморозових відкладень на повітряних лініях.

Ключові слова: інтелектуальні мережі, гнучкі системи передавання електроенергії, автоматизована система, нейронна мережа.

Висока вартість органічних видів палива, обмеженість їх ресурсів та постійне зростання попиту на електричну енергію (за прогнозами на 2,2% щорічно) спонукає до пошуку вирішення питань ефективного енерговикористання та енергозабезпечення і розвитку альтернативних джерел електроенергії. На сьогодні енергія є одним із першочергових факторів існування суспільства, що в свою чергу потребує розвитку «енергетичного мислення» у світі, в тому числі і в Україні.

Основними проблемами електроенергетичної галузі України є значна зношеність обладнання електромережевого комплексу, а також відомча роз'єднаність в цій сфері. Підвищення надійності систем електропостачання неможливе без реформування електроенергетики та впровадження сучасних технологій. Однією з таких технологій є технологія концепції Smart Grid, що дозволяє ефективно використовувати різні джерела генерації, в тому числі енергію сонця та вітру, зменшити втрати при передачі електричної енергії, зробити мережі гнучкими [3].

Модернізація і розвиток електроенергетичної галузі України пов'язані з вирішенням питань керування режимами роботи в енергосистемі, створенню більш ефективних засобів транс-портування і розподілення електроенергії, що потребує застосування нових технологій. Найбільш перспективним на сьогоднішній день є реалізація проектів гнучких систем передавання електроенергії змінного струму (FACTS – Flexible Alternating Current Transmission Systems) і створення платформи Smart Grid [2]. Згідно [2] термін Smart Grid визначає електричні мережі як інтелектуальні електромережі які використовують швидкозростаючий комплекс сучасних технологій, технологічних процесів, улаштувань та додатків, за допомогою яких створюються електронні комунікації нового покоління.

Для скорочення витрат енергії та збереження довкілля вже реалізований ряд проектів з впровадження інтелектуальних мереж у різних країнах світу. В концепції Smart Grid значна увага приділяється питанню безпроводного обміну інформацією, що дозволяє прогнозувати генерацію електроенергії, визначати її доступність, ефективно використовувати та керувати її споживанням.

Концептуальні визначення інтелектуальної мережі вказують на важливу роль її в подальшому технологічному, економічному та екологічному розвитку суспільства. Крім вирішення задач зниження навантаження на навколишнє середовище, зменшення енергетичного дефіциту за рахунок використання поновлюваних джерел енергії, підвищення якості та надійності роботи енергосистеми в концепції ще є ще один дуже важливий аспект: Smart Grid є каталізатором економічного підйому.

Одним із основних показників, який необхідний для модернізації і подальшого розвитку енергосистем з метою підвищення ефективності управління режимами їх роботи на базі платформи

Smart Grid є контроль поточних параметрів поточного стану повітряних ліній (ПЛ) з ура-хуванням

метеоданих [6]. Використання метеоданих дозволяє проводити моніторинг параметрів навколишнього середовища в районі розміщення ПЛ і, відповідно, контролювати їх поточний стан, що дозволить оптимізувати використання їх реальної пропускну здатності, контролювати рівень технологічних втрат, виконувати оцінку граничних значень довгострокових і коротко-строкових струмів навантаження, регулювати перетоки потужності на повітряних лініях, а та-кож давати оцінку погодним умовам у відповідних районах для аварійних бригад.

Тому моніторинг аварійних параметрів ПЛ і метеоумов у місцях їх експлуатації, збір і зберігання статистичних даних, прогнозна оцінка технічного стану ПЛ є актуальними завданнями на сучасному етапі.

Оперативний спеціалізований технічний і метеорологічний моніторинг можливо здійснити шляхом впровадження автоматизованої системи контролю аварійних режимів повітряних ліній і метеопараметрів у заданих точках електричних мереж, яка розроблена кафедрою Електропостачання та енергетичного менеджменту ХНТУСГ ім. Петра Василенка і ТОВ «НЕТ» і впроваджена в електричні мережі АК «Харківобленерго».

Можливості системи:

- сигналізація про аварійний стан лінії;
- визначення безконтактним способом в реальному режимі часу аварійних станів (міжфазне коротке замикання і відсутність напруги) в точках установки датчиків на лінії;
- визначення перевищення заданих критичних значень метеорологічних параметрів (температура і відносна вологість) в точках установки датчиків на лінії;
- збір і зберігання в базі даних інформації про стан ділянок ПО напругою 6-10 кВ.

Автоматизована система побудована за ієрархічним принципом і має мікроконтролер нижнього рівня (автоматизовані блоки виносні (БВ)), що встановлені на об'єктах електричних мереж (опорах ліній електропередачі і т.п.), блоки диспетчерські (БД), призначені для встановлення на диспетчерських пунктах (підстанціях) енергосистеми.

Між пристроями нижнього рівня БВ і БД забезпечений бездротовий стільниковий зв'язок для збору первинної технічної й метеорологічної інформації.

Зібрана інформація зберігається на персональному комп'ютері (ПК), до якого підключений блок БД. Програмне забезпечення ПК нижнього рівня формує базу даних зібраної інформації, яка використовується для оперативного керування ділянкою електричної мережі і є сполучною ланкою з іншими ієрархічними рівнями системи керування енергетичного об'єкта.

Концепція побудови автоматизованої системи базується на використанні стільникового зв'язку стандарту GSM для передачі інформації між пристроями нижнього рівня й диспетчерськими станціями енергосистеми. При цьому автоматично забезпечується наскрізна адресація всіх вузлів мережі за рахунок присвоєння абонентських номерів стільниковому зв'язку. Це дає можливість доступу до первинної інформації на будь-якому рівні ієрархії системи керування, а також можливість дублювання каналів приймання інформації.

Для технічного забезпечення передачі інформації використовуються GSM-модеми стільникового зв'язку, що вбудовані в блоки БВ і блоки БД. Враховуючи, що GSM-модеми, мають більшу чутливість прийому, ніж мобільні телефони, і виносну антену, то дальність зв'язку в буде більшою.

Для контролю ожеледної ситуації на ПЛ до даної системи вмикаються датчики маси проводу та швидкості вітру, що забезпечує оперативний персонал електропостачальної організації інформацією про утворення ожеледі на ПЛ.

Особливої уваги потребує реалізація функції системи контролю утворення ожеледі, яка полягає у короткостроковому та довгостроковому прогнозі ожеледно-паморозевих відкладень на ПЛ [5]. Головним параметром, який підлягає прогнозуванню, є вага проводу, вкритого ожеледдю.

Ця функція може бути реалізована на основі нейромережевого моделювання, яке базується на числовому аналізі експериментальних даних, що описують реальні періоди зледеніння ПЛ і супутні цьому погодні та інші умови. Вищезгаданий підхід має високу гнучкість, здатність обробляти нечітку недостовірну інформацію, адаптуватися до мінливих умов функціонування, здатністю до самовдосконалення. Всі ці властивості є корисними при побудові систем прогнозування ожеледного навантаження, так як тут доводиться мати справу з різного роду невизначеністю, нестаціонарністю та іншими складнощами.

Основою для моделювання є дані автоматизованої системи контролю аварійних режимів повітряних ліній і метеопараметрів у заданих точках електричних мереж.

Задача прогнозування полягає в створенні на основі архівних даних спостережень математичної моделі вигляду

$$M(k+h)=F(M(k), \dots, M(k-d), M_{\max}(k), \dots, M_{\max}(k-d), T(k), \dots, T(k-d), H(k), \dots, H(k-d)), \quad (1)$$

де k – номер поточної години;
 h – інтервал прогнозування, прийнятий рівним 2 годинам;
 d – порядок моделі, що відповідає глибині використання архівних даних;
 $M(k), M_{\max}(k)$ – відповідно середня та максимальна вага проводу для години k ;
 $T(k), H(k)$ – відповідно температура та відносна вологість повітря, які впливають на процес утворення ожеледі, для години k ;

$F(\bullet)$ – перетворення, яке повинно бути знайдене.

Дана задача може бути вирішена з використанням нейронної мережі на основі гібридних нейроподібних елементів, рис. 1 [7].

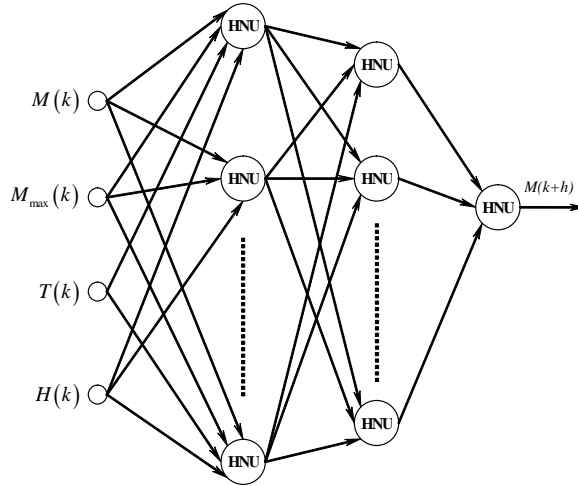


Рисунок 1 – Нейронної мережі на основі гібридних нейроподібних елементів

Вхідними сигналами мережі є поточні значення прогнозованої змінної $M(k)$ та інших величин $M_{\max}(k), T(k), H(k)$, які контролюються датчиками та передаються каналом зв'язку на диспетчерський пункт. Подавати на вхід попередні вимірювання немає необхідності, оскільки вони формуються автоматично всередині гібридних нейроподібних елементів HNU. Структура гібридного нейроподібного елемента наведена на рис. 2.

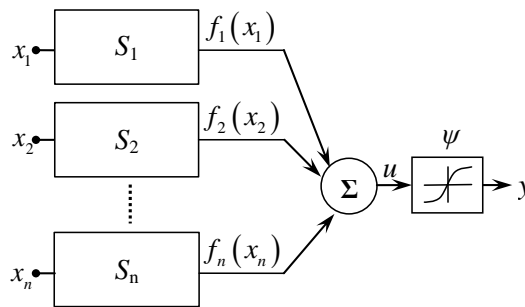


Рисунок 2 – Структура гібридного нейроподібного елемента

Вхідні сигнали $x_i (i=1, \dots, n)$ перетворюються з допомогою синапсів різних типів S_i в сигнали $f_i(x_i)$, які потім об'єднуються в сигнал внутрішньої активації $u = \sum_{i=1}^n f_i(x_i)$. Вихідний сигнал нейроподібного елемента формується з допомогою нелінійної активуючої функції

$$y = \psi(u) = \psi\left(\sum_{i=1}^n f_i(x_i)\right), \quad (1)$$

де в якості $\psi(u)$ використовується сигмовидна функція або гіперболічний тангенс.

Висновки. Організація моніторингу параметрів поточного стану ПЛ з урахуванням метеоданих в режимі реального часу дозволить підвищити ефективність автоматизації і управління режимами роботи енергосистем на базі платформи Smart Grid.

Застосування автоматизованої системи контролю аварійних режимів повітряних ліній і метеопараметрів у заданих точках електричних мереж із реалізацією функції прогнозування утворення ожеледно-паморозевих відкладень забезпечує обслуговуючий персонал електромереж інформацією про стан повітряних ліній електропередавання в режимі реального часу, а також дає можливість завчасної підготовки до проведення відповідних заходів для боротьби з прогнозованою ожеледдю, що в свою чергу підвищує надійність роботи електричних мереж та ефективність систем електропостачання споживачів

Список використаної літератури

1. European Smart Grids Technology Platform. Vision and Strategy for Europe's Electricity Networks of the Future. – Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities, 2006.
2. Дорофеев В. В., Макаров А. А. Активно-адаптивная сеть – новое качество ЕЭС России // Энергоэксперт. – 2009. – № 4 – С.15.
3. Попадченко С. А. Ефективність електропостачання споживачів в умовах Smart Grid // Вісник ХНТУСГ ім. Петра Василенка Випуск 153 «Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України» – Харків: ХНТУСГ, 2014. – С.17 – 19.
4. Толшаков А. В. SMART GRID: развитие, практика, проблемы // Энергонадзор, 2014, № 1 – С. 53., № 2 – С.54.
5. Савченко О. А., Дюбко С. В. Перспективні шляхи вдосконалення автоматизованих систем контролю утворення ожеледі на ПЛ // Вісник ХНТУСГ ім. Петра Василенка Випуск 175 «Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України» – Харків: ХНТУСГ, 2016. – С.20 – 22.
6. Черемисин Н. М., Зубко В. М., Холод А. В., Черкашина В. В., Рудь Т. С. Повышение эффективности АСУ ТП подстанций за счет мониторинга параметров воздушных линий и окружающей среды на базе платформы Smart Grid // Вісник ХНТУСГ ім. Петра Василенка Випуск 129 «Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України» – Харків: ХНТУСГ, 2012. – С.14 – 16.
7. Черемисин Н. М., Попов С. В., Савченко О. А., Шкуро К. О., Пархоменко О. В. Эффективность мониторинга воздушных линий электропередавания в ожеледных районах // Наукові праці Донецького національного технічного університету, № 2 (15) 2013. – Донецьк: ДНТУ, 2013. – С. 261 – 264.

УДК 621.317

А.Н. Мороз, д-р техн. наук, проф.
Н.М. Черемисин, канд.техн.наук, проф
А.А. Савченко, канд.техн.наук, доц
С.А. Попадченко, магістр
С.В. Дюбко, магістр

Харьковский национальный технический университет сельского хозяйства имени Петра Василенка ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ SMART GRID ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ

В статье рассматривается вопрос технологии Smart Grid в эффективности электроснабжения потребителей на современном этапе. Рассмотрены основные проблемы, которые существуют в настоящее время в электроэнергетической отрасли. Исследована эффективность внедрения автоматизированной системы контроля аварийных режимов воздушных линий и метеопараметров и сделан анализ основных возможностей данной системы. Предложена модель прогнозирования гололедно-изморозевых отложений на воздушных линиях.

Ключевые слова. Интеллектуальные сети, гибкие системы передачи электроэнергии, автоматизированная система, нейронная сеть.

O. Moroz, Dr. Eng. Sc., Prof.
N. Cheremisin, Cand. Sc. (Eng.), Prof.
O. Savchenko, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof.
S. Popadchenko, Msc.
S. Diubko, Msc.

Kharkiv Petro Vasylenko National Technical University of Agriculture

USING SMART GRID'S TECHNOLOGIES FOR INCREASING EFFICIENCY OF CONSUMERS' ELECTRIC SUPPLY

The article considers the issue of Smart Grid technology in the efficiency of consumers' electric supply. The main problems that currently exist in the energy sector are considered. The effectiveness of the implementation of an automated monitoring system for emergency modes of overhead lines and meteorological parameters was studied and made an analysis of the main capabilities of this system. A model for predicting icyfrost deposition on power lines is proposed.

Key words: intelligent networks, flexible power transmission systems, automated system, neural network.

References

1. European Smart Grids Technology Platform. Vision and Strategy for Europe's Electricity Networks of the Future. – Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities, 2006.
2. Dorofeev V. V., Makarov A. A. Active-adaptive network – a new quality of the U E S of Russia // *Energoexpert*. – 2009. – № 4 – 15 p. (Rus).
3. Popadchenko S. A. Efficiency of a power supply to consumers in the Smart Grid // *Visnik KHNTUSG im. Petra Vasilenka*. An issue is 153. «Problems energy providing and energysavings in APK of Ukraine» – Kharkov: KHNTUSG, 2014. – 17– 19 p. (Ukr).
4. Tolshakov A.V. SMART GRID: Development, practice, problems // *Enerhonadzor*, 2014, № 1 – С. 53., № 2 – 54 p. (Rus).
5. Savchenko O. A., Diubko S. V. Perspective ways of improvement of automated control systems of the formation ice on power lines // *Visnik KHNTUSG im. Petra Vasilenka*. An issue is 175. «Problems energy providing and energy-savings in APK of Ukraine» – Kharkov: KHNTUSG, 2016. – P. 20– 22. (Ukr).
6. Cheremisin N. M., Zubko V. M., Kholod A. V., Cherkashina V. V., Rud T. S. Increase of efficiency of ACS TS due to monitoring of parameters of overhead lines and environment on the basis of Smart Grid // *Visnik KHNTUSG im. Petra Vasilenka*. An issue is 129 «Problems energy providing and energysavings in APK of Ukraine» – Kharkov: KHNTUSG, 2012. – P.14-16 (Rus).
7. Cheremisin N. M., Popov S. V., Savchenko O. A., Shkuro K. A., Parhomenko O. V. Efficiency of monitoring of overhead power lines in icestorm regions // *Naukovi praci DNTU*, – № 2 (15) – 2013. – Donetsk: DNTU, 2013. – P. 261– 264. (Ukr).

Надійшла 10.04.2017

Received 10.04.2017

V. Zhuikov, Dr. Eng. Sc., Prof.
K. Osypenko, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof.
National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

PRINCIPLE OF PREEMPTIVE CONTROL IN SMART GRID

The necessity of implementing the principle of preemptive control in the Smart Grid is shown. It is mentioned that features of centralized, decentralized and combined control are based on the Heisenberg uncertainty principle, principle of synergetic development and principle of cognitive control. Five hierarchy levels of control with control objects and strategies are described. Social and personal aspects of preemptive control formation are studied. Main steps of preemptive control are shown.

Keywords: cognitive control, distributed generation, Heisenberg uncertainty principle, preemptive control, Smart Grid.

Introduction

Distributed generation, as part of the trend of world development and evolution of the energy base of Smart Grid, becomes a clearly defined independent and, in many cases, the only possible solution to provide electric energy to separate social and socio-geographical entities [1]. The technical level of implementation of energy and information platforms of Smart Grid depends on the covered space, climatic conditions, the number and density of population, which quality of life, in its turn, is directly determined by the amount of electric energy per one person, as well as by the efficiency of system operation. The vivid illustration of the future of such systems is reflected in the proposal of Stanford University employee Mark Jacobson – to transfer 20 million New York State on renewable energy sources [2]. This results in sufficient backgrounds for the development of Smart Grid and Micro Grid.

The community of many individuals, who are both owners and users of independent technical components of the distributed generation system, raises questions for the individual members of the community and the community in general, on solution of which depends not only the well-being, but also the existence of a new socio-technical system, namely:

1) what are the directions of development and transformation of the community, based on a single fully inclusive energy and informational platforms, or the society with the “internet of all with energetic of all for all”?

2) what is the effect on the individual and community development of the necessary for their existence and permanent energy and information environment, in which individuals, socio-economic, socio-technical and other social groups exist?

3) what are the features of the distributed generation system control structure and process, which is the basis of the “electricity market” that is active in the energy and information environment?

4) which indicators determine the status and direction of society development, the uniting base of which is the aggregate and individual ownership of energy platform, as well as aggregate and individual participation in the energy distribution and exchange, which is a determining factor in ensuring the prosperity and well-being of community members?

Structuring the community, that is built on a common energy and information platform, is based on the formation of some of the socio-technical groups with double structure – human and associated energy and information platform – are considered both – as a resource and as a factor in the formation of the community that directly determines the necessity of implementing the principle of preemptive control in distributed generation systems.

Control systems aspects of construction and levels of the hierarchy

Energy and informational community platform creates the necessary conditions for the formation of structures and relationships that are adequate to this platform. Sufficient conditions for the functioning of the system as a whole are determined by the presence of the distributed in time and space control system that puts in accordance with each other the order of interaction of hierarchical technical and social system structures; determines the sequence of actions; carries out the selection of decision-making objectives, criteria and methods. Due to its global property the system organically integrates and implements centralized, decentralized and combined control [3]. Three mentioned principles of control implementation are based on the following aspects.

First of all, it is the **Heisenberg uncertainty principle** [4] that regarding to the physical phenomena indicates the impossibility of arbitrarily precise time-frequency representation of the signal. The action of the

Heisenberg principle points to the limited accuracy of decision making and the possibility of errors accumulation during the prolonged operation, which determines the need to create specific control actions that minimize the negative phenomena.

Secondly, it is the **principle of synergetic development**. The concept of the synergetic structure in relation to the social and technical community is considered as a condition that occurs as a result of multivariate and ambiguous behavior of multi-structures and/or multifactorial environments, which determines the need to generate control actions, ensuring the formation of the positive direction of community development vector and elimination of negative phenomena and the prevention of accidents.

Thirdly, it is **the principle of cognitive control**. As a consequence of the above-mentioned duality property of constituting community the participation of the individual in the formation and development of social groups based on its cognitive, mental and emotional qualities simultaneously defines its role in the formation of market relations, the object of the action of which are the volume and the quality of the generated, exchanged and used: 1) energy; 2) information; 3) copyright. This necessitates the implementation in the control structure the laws of cognitology that combines the theory of knowledge, psychology, artificial intelligence, and other aspects related to accumulation and implementation of the knowledge [5].

In the distributed generation systems marked aspects define the logic of construction and operation of general control, wherein five levels of hierarchy are identified (Table 1).

The first level corresponds to the separate systems of generation, distribution, conversion and storage of electric energy state control. Control systems at this level set operation algorithms of power equipment, providing the required parameters of electric energy.

Table 1 – five levels of hierarchy are identified

	Hierarchy levels	Control object	Control strategy
5	Preemptive control	Big and small Smart Grid, smart houses	State control of the nodes, connections, tariffs, prohibition on decision making
4	Big data and context-aware control	Big Micro Grid systems as a part of bigger system	Decision making about state of nodes, connections, tariffs
3	Context-aware control	Smart houses, Micro Grid	Decision making about operation modes, reference values, comfort level
2	Centralized and decentralized control	Systems of converters of electrical energy parameters	Operation modes, parameters, stability control
1	Centralized control	Converters of electrical energy parameters	Reference values control

The **second level** corresponds to control of a group of commonly operating power devices included in the system with a multi-loop feedback, defining operation modes, look of external load characteristics and stable operation conditions of the system while maintaining the specified parameters of electric energy on the load with the required comfort level.

The **third level** of hierarchy corresponds to the application of context-aware control system. This system is based on the application of: 1) microprocessor control systems; 2) stream processing methods; 3) operational applications; 4) smart sensors of electrical parameters, primary energy flows, environment and habitat. Such control systems are implemented, provided the integration of electricity transfer systems and information systems that provide energy and information interaction platform, creating a Smart Grid technology.

The construction of control systems of the **fourth level** is based on the joint application of the theory of big data, context-aware control and installed operational applications designed for efficient use of energy and the stable operation of the whole system [6]. With this the knowledge of person that makes decision is used indirectly and implemented in the installed operational applications with subsequent adjustment as a result of the accumulation of knowledge about current social and technological processes.

However, with the presence of multivariate solutions cluster, the synergy and the cognitivity of the system, the chosen solution can lead to positive as well as negative, catastrophic development status of Smart Grid. The countering to negative phenomena is achieved by using a control system, located on the **fifth level** of hierarchy, which implements the principle of preemptive control. The preemptive control concept, used in 2002 in the text of National Strategy Security of the United States, is effective when applied to the control of the complex structure of social and technical community with the implementation of new relations, based on the concept of “Internet of all with energy for all”. When applied to the considered control the actions of the system are reduced to the following steps:

1) change and/or installation of a new operation mode of interaction of the third and fourth hierarchy levels on the generation, exchange and accumulation of energy;

2) formation at these levels new communications and relations with the inclusion of new operational applications;

3) achievement of sustainable relations based on new and revised operational applications and interaction rules.

If during the further operation the system approaches the critical point, preemptive control repeats steps 1 – 3, implementing in advanced way the elimination of the threat of the destruction of the system, and the localization of technical objects, generating the threat.

The social aspect of preemptive control formation

From the point of social structure the entire community, consisting of separate interacting socio-technical structures, should meet certain requirements, which include: 1) the presence of a limited area of existence of the community, which is determined by the common energy platform of distributed generation system; 2) the community ownerships their own system of social and technical control; 3) the formation of a new establishment history, that is inherent to this exact community; 4) the formation of a new community structure based on energy, information, economic and cognitive transactions; 5) the possibility of increasing the community human resource with increasing level of power generation or increasing the proportion of the relative energy per one person; 6) the development of their own financial and property markets based on the generation, storage, exchange, sale and purchase of energy of distributed generation systems.

Any actions on changing the current state of the system should start with the first step – confirmation of the authority of subject, who is about to make such actions. If there is no confirmation the preemptive control system blocks the proposed technical changes, perceiving them as a threat, and selects the most stable version of the system structure, prohibiting for some time any other actions, performing specific technical task of maintaining the system integrity and working capacity. After the confirmation of authority the second step is following – the evaluation of the proposed technical changes in modes and connections. After selecting the technical solution the third step is following – signing up the contracts. The confirmation of the signed contracts allows passing to the fourth step – the change in the technical state of the system, passing to new generation modes, new connections, and new terms of energy accumulation. On the fifth step the verification of the system stability and fixation of its state for a certain time interval, allowing fulfilling the terms of contracts, is implemented. The collection of information about the formation of new contracts is made on the sixth step. The process is repeated in a cycle from the first step. With this energy and information platforms of the entire system must meet the requirements of the community in the implementation of their needs of physiological comfort and financial well-being.

By establishing on the **first** step a new interaction mode, the preemptive control, using formulated by Elinor Ostrom [7] the basic principles of stable control of local resources, artificially forms the community structure and gives the first “impulse” for the beginning of commercial activity of “energy market”, preemptively indicating some of the social, legally appointed groups and built community structures.

The **second** step of preemptive control – the formation of new connections and relations on the third and fourth control levels – can be implemented given that the technical level of power electronics devices is compliant to the possibility of implementing the decisions of problems of these levels, as well as to the possibility of implementing the decisions of problems of preemptive control. Furthermore on the second step power electronics devices should ensure the execution of requirements on small-scale production development, which is formed due to the natural structure of distributed generation and it’s belonging to the technical systems of limited power and respectively to the limited financial volume of wide range of owners.

The **third** step – achieving the stable relations – also cannot be implemented without ensuring the system technical capacity. This determines the need: firstly, to form the Micro Grid with concentration devices and the presence of energy connections with neighboring distributed generation systems; secondly, to ensure the required quality of energy; thirdly, to ensure stability of the system; fourth, to ensure the comfort and the ability to act on the “electricity market” for independent Micro Grid, based on context-aware control algorithms; and fifth, to control by using big data to ensure delivery reliability and efficiency of sales and purchases of energy of the entire community.

The personal aspect of preemptive control formation

The principle of control cognition, based on the actions and knowledge of individuals that affect the process of functioning and development of the system and its structure indirectly through operational applications and directly by the decision-making in the operating process, reflects the duality property of individuals as a system resource and as a factor of influence. The last, depending on the actions, the capacity and capabilities of each of the individuals in a certain synergetic association of actions and capabilities enables the evolution of the knowledge of the entire system. No matter to which aspects of the system functioning the actions of individuals were applied, their level of influence on the system depends on such defining personal qualities in this aspect, as: 1) the intellectual level; 2) the level of self-esteem; 3) field independence; 4) the level of professional training. A priori, is understandable that not all knowledge carriers are pursuing socially positive purposes, although knowledge about the negative actions and their consequences are the positive result, and therefore the complete elimination

of the negative actions is not undesirable, but impossible. The most difficult for fixation and localization are those individuals, who have all four personal qualities of high level. Negative or criminogenic to community behavior is activated by such motives as: 1) hypertrophied claims of a material nature; 2) the need to express negative emotions; 3) hostility to anything specific; 4) social exclusion; 5) legally inadequate stereotypes. These motives, in one way or another, are related to the emotional state of the individual [8].

In the case of critical points appearance, the preemptive control as a system of the highest level by implementing the first step of control:

– **firstly**, blocks the nodes that are posing a threat to the integrity of the entire system, by disconnecting them from the control of systems of the third and fourth levels, maintaining the control of systems of the first and second levels, but specifying the impacts, indicating thereby the specific operating modes of converters and, respectively, generators, and tariffs of sale and purchase of energy. These features may be delegated to the converters control systems for quicker blocking of destabilizing decisions at the local level;

– **secondly**, if necessary, changes the structure, imposes certain communication tariffs, the way of energy transfer, leaving some non-hazardous zone for variation of these parameters for obtaining the information on evaluation of the process development;

– **thirdly**, continue to the next control steps.

Actions on other methods of localization, assessing the level of danger and impact on the node, that provoke active actions of preemptive control, do not belong to a technical area.

Conclusions

Thus, the implementation of the principle of preemptive control in the construction of big and small Smart Grid on the stages of forming the energy and information structure, control of the status of individual objects and tariffs in the system, taking into account the social and personal aspects of the community of individuals formation ensures the stable operation of such systems.

References

1. I. Dumitrache, D. I. Dogaru, “Smart Grid Overview: Infrastructure, Cyber-Physical Security and Challenges,” presented at the 20th Int. Conf. on Control Systems and Computer Science (CSCS). Bucharest, Romania, May 27-29, 2015.

2. M. Z. Jacobson, M. A. Delucchi, G. Bazouin, M. J. Dvorak, R. Arghandeh, Z. A. F. Bauer, A. Cotte, G. M. T. H. de Moor, E. G. Goldner, C. Heier, R. T. Holmes, S. A. Hughes, L. Jin, M. Kapadia, C. Menon, S. A. Mullendore, E. M. Paris, G. A. Provost, A. R. Romano, C. Srivastava, T. A. Vencill, N. S. Whitney, T. W. Yeskoo, “A 100% wind, water, sun-light (WWS) all-sector energy plan for Washington State,” *Renewable Energy*, vol. 86, pp. 75 – 88, – Feb. 2016.

3. M. A. Aminu, K. Solomon, “A Review of Control Strategies for Microgrids,” *Advances in Research*, vol. 7(3), pp. 1 – 9, May 2016.

4. W. Z. Heisenberg, “Über den anschaulichen Inhalt der quantentheoretischen Kinematik und Mechanik,” *Zeitschrift für Physik*, vol. 43, iss. 3, pp. 172 – 198, March 1927.

5. L. Shuhui, F. Xingang, I. Jaithwa, E. Alonso, M. Fairbank, D. C. Wunsch, “Control of Three-Phase Grid-Connected Microgrids using Artificial Neural Networks,” in *Proc. of the 7th International Joint Conference on Computational Intelligence*, 58-69, 2015, Lisbon, Portugal.

6. E. V. Verbitsky, A. G. Kyselova, K. S. Osypenko, “Context-aware control of autonomous power supply systems,” Kyiv, Ukraine: Avers, 2015, 187 p. (Ukr.)

7. E. Ostrom, “Governing the Commons: The Evolution of Institutions for Collective Action,” Cambridge University Press. ISBN 0-521-40599-8, – 1990.

8. A. V. Kyrylenko, “Smart Grid in perspective of a systematic methodology,” *Works of Institute of Electro-dynamics of National Academy of Science of Ukraine*, special iss., – pp. 63-72, – June 2011. (Rus.)

В.Я. Жуйков, д-р техн. наук, проф.
К.С. Осипенко, канд. техн. наук, доц.

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
ПРИНЦИП ПРЕЕМПТИВНОГО КЕРУВАННЯ У SMART GRID

Показана необхідність реалізації принципу преємптивного керування в Smart Grid. Відзначається, що особливості централізованого, децентралізованого та комбінованого керування засновані на принципі невизначеності Гейзенберга, принципі синергетичного розвитку та принципі когнітивного керування. Описано п'ять ієрархічних рівнів керування з об'єктами та стратегіями керування. Досліджуються соціальний і особистісний аспекти формування преємптивного керування. Показані основні етапи преємптивного управління.

Ключові слова: когнітивне керування, розосереджена генерація, принцип невизначеності Гейзенберга, преємптивне керування, Smart Grid.

Список використаної літератури

1. I. Dumitrache, D. I. Dogaru, "Smart Grid Overview: Infrastructure, Cyber-Physical Security and Challenges," pre-sented at the 20th Int. Conf. on Control Systems and Computer Science (CSCS). Bucharest, Romania, May 27-29, 2015.

2. M. Z. Jacobson, M. A. Delucchi, G. Bazouin, M. J. Dvorak, R. Arghandeh, Z. A. F. Bauer, A. Cotte, G. M. T. H. de Moor, E. G. Goldner, C. Heier, R. T. Holmes, S. A. Hughes, L. Jin, M. Kapadia, C. Menon, S. A. Mullendore, E. M. Paris, G. A. Provost, A. R. Romano, C. Srivastava, T. A. Vencill, N. S. Whitney, T. W. Yeskoo, "A 100% wind, water, sun-light (WWS) all-sector energy plan for Washington State," *Renewable Energy*, vol. 86, pp. 75 – 88, Feb. 2016.

3. M. A. Aminu, K. Solomon, "A Review of Control Strategies for Microgrids," *Advances in Research*, vol. 7(3), pp. 1 – 9, May 2016.

4. W. Z. Heisenberg, "Über den anschaulichen Inhalt der quantentheoretischen Kinematik und Mechanik," *Zeitschrift für Physik*, vol. 43, iss. 3, pp. 172 – 198, March 1927.

5. L. Shuhui, F. Xingang, I. Jaithwa, E. Alonso, M. Fairbank, D. C. Wunsch, "Control of Three-Phase Grid-Connected Microgrids using Artificial Neural Networks," in *Proc. of the 7th International Joint Conference on Computational Intelligence*, 58-69, 2015, Lisbon, Portugal.

6. Вербицький Є.В., Кисельова А.Г., Осипенко К.С. Контекстно-залежне керування автономними системами електроживлення: під загальною редакцією д.т.н. Жуйкова В.Я. – К.: Аверс, 2015. – 187 с. (Ukr.)

7. E. Ostrom, "Governing the Commons: The Evolution of Institutions for Collective Action," Cambridge University Press. ISBN 0-521-40599-8, – 1990.

8. Кириленко А.В. и др. Смарт-грид в ракурсе системной методологии // *Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України. Спец. випуск*. – 2011. – С. 63 –72. (Rus.)

В.Я. Жуйков, д-р техн. наук, проф.
К.С. Осипенко, канд. техн. наук, доц.

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
ПРИНЦИП ПРЕЕМПТИВНОГО УПРАВЛЕННЯ В SMART GRID

Показана необхідність реалізації принципу преємптивного управління в Smart Grid. Отзначається, що особливості централізованого, децентралізованого і комбінованого управління засновані на принципі неопределенности Гейзенберга, принципі синергетичного розвитку і принципі когнітивного управління. Описані п'ять ієрархічних рівнів управління з об'єктами і стратегіями управління. Изучены социальный и личностный аспекты формирования преємптивного управления. Показаны основные этапы упреждающего управления.

Ключевые слова: когнітивне управління, розподілена генерація, принцип неопределенности Гейзенберга, преємптивне управління, Smart Grid.

Надійшла 26.06.2017
Received 26.06.2017

МОНІТОРИНГ, ДІАГНОСТИКА ТА КЕРУВАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ ТА ОБЛАДНАННЯМ MONITORING, DIAGNOSTIC AND MANAGEMENT OF POWER PROCESSES AND EQUIPMENT

M. Ostroverkhov, Dr. Eng. Sc., Prof.

V. Pyzhov, Cand. Sc. (Eng.)

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

EFFECTIVE CONTROL OF FIELD REGULATED RELUCTANCE MACHINE

The electrical drive based on field regulated reluctance machine is a good alternative to the induction drive because of various advantages related to energy efficiency. At the same time this type of drive is sensitive to coordinate and parametric disturbances which may affect energy efficiency and quality of control in various technological processes. This paper is to propose the method of development of control laws based on an idea of the reversibility of the Lyapunov direct method for the stability analysis, and using the instantaneous value of energy as the predetermined Lyapunov function. This will ensure effective operation with a lesser sensitivity to variations of the motor's parameters, as well as the simplicity of realization of control system.

Key words: control, effective, field regulated reluctance machine.

Introduction. In many industries, the promising alternative to the most widely used induction electrical drive is one based on a field regulated reluctance machine (FRRM). Main advantages of this type of motors [2] are: high efficiency factor within a wide speed range; power factor is about 100%; a simple design and low production costs; high manufacturability and reliability; a wider speed control range in a zone of reduced magnetic flux; an easier heat removal. This study is dedicated to motor with independent electromagnetic excitation. It has a passive rotor with tooth structure and a stator with a classic distributed “star” 3-phase winding. Additionally, there is an excitation winding which is supplied from a direct current source. Miscalculations during identification of the parameters of the equivalent circuit of the FRRM can be caused by assumptions used in an applied methodology, as well as by the lack of basic information. During the motor operation, resistance of windings may be changed because of heating, and inertia moment may be deviated through changes of the kinematics. These parametric deviations resulted in differences between estimated and actual parameters of the electrical drive, which, in turn, leads to worsening of control performance. Naturally, the FRRM, as well as other types of alternating current motors, is an interrelated controlled object, substantially dependent on influence of inducted eddy currents. In this case, electrical drive control requires compensation of negative influence of these coordinate disturbances. Solution of the above mentioned problems by the classic methods of the automatic control theory, under the under conditions of uncertainties in a mathematical model, is rather complicated because requires additional algorithms of identification, adaptation or compensation. Analysis of methods for control law optimization showed [6] that solutions can be found based on a concept of reverse task of dynamics in combination with minimization of local functionals of instantaneous values of energies [3-5]. The reverse task of dynamics is to identify the control law which would ensure a given quality of control with desired static and dynamic performance of the system. The proposed method is based on an idea of the reversibility of the Lyapunov direct method for the stability analysis. This allows defining control laws which ensure that a closed loop has the predetermined Lyapunov function in form of the instantaneous value of energy. In this case, the specificity of optimization is not obtaining the absolute minimum of the quality functional, as usually used in traditional systems, but rather getting a certain minimal value which would assure a technically allowable dynamic error of the system.

This paper is aimed at the identification of respective control laws which would allow a lesser sensitivity to variations of the motor's parameters, as well as the simplicity of realization of the control system, and consequently ensure good control performance of electrical drive, required for most of industrial technologies.

Methodology of the study. A mathematical model of SIM IE in the coordinate system (d-q), oriented by the rotor magnetic axis, can be described by known non-linear equation system (1). It is shown from (1) that motor's coordinates are interrelated because of the existing nonlinearity caused by the operation of multiplication and

coordinative disturbances. In classic control systems, compensation of the negative influence of coordinative disturbances is to be realized through setting specific feedbacks, the effectiveness of which depends on the accuracy of motor's parameters. It is also possible to identify control laws based on the static decomposition of the controlled object (1) resulting in complication of the control system. In this study, solution is being found through the dynamic decomposition [1], using optimization method proposed in [3]. During the control system design, coordinate deviations $F_1 = L_m \frac{di_f}{dt} - \omega \Psi_q$, $F_2 = \omega \Psi_d$, and $F_3 = L_m \frac{di_d}{dt}$ are usually interpreted as indeterminate, but value limited $F_1 \leq F_{1max}$, $F_2 \leq F_{2max}$, $F_3 \leq F_{3max}$, while values of control signals u_d , u_q , u_f are sufficient for their compensation. In this case, a problem to control the interrelated controlled object comes to finding solution of local tasks to control four liner subsystems (1).

$$\left\{ \begin{array}{l} L_s \frac{di_d}{dt} + R_s i_d = u_d + F_1; \\ L_s \frac{di_q}{dt} + R_s i_q = u_q + F_2; \\ L_f \frac{di_f}{dt} + R_f i_f = u_f + F_3; \\ J \frac{d\omega_r}{dt} = M - M_c; \\ \Psi_d = L_s i_d + L_m i_f; \\ \Psi_q = L_s i_q; \\ \Psi_f = L_f i_f + L_m i_d; \\ M = \sqrt{3} Z_p [\Psi_d i_q - \Psi_q i_d], \end{array} \right. \quad (1)$$

where i_d, i_q and u_d, u_q – d-axis and q-axis stator currents and voltages respectively; i_f and u_f – excitation current and voltage; $\omega = Z_p \omega_r$ and ω_r – electrical and angular rotor speed; Z_p – pole couple number; J – inertia moment; M, M_c – electromagnetic motor torque and load torque; Ψ_d, Ψ_q, Ψ_f – d- and q-axis, as well as excitation winding fluxes; L_s, L_f, L_m – stator, excitation winding and mutual inductance; R_s, R_f – stator and excitation winding resistances.

The vector control system, according to first four differential equations of the system (1) consist of four control loops: for stator d-axis current i_d , q-axis current i_q , excitation current i_f , and motor speed ω_r . The speed loop is external to the internal loop of current i_q . This current defines a value of the electromagnetic torque of a motor. The excitation current i_f can be easily controlled within the range 1:8. This allows increasing a range of speed control with a constant power, in comparison with induction motor.

An object of the local control loop for the stator current i_d according to the 1st equation of the system (1)

$$L_s \frac{di_d}{dt} + R_s i_d = u_d + F_1 \quad (2)$$

can be described by the first order linear differential equation with control signal u_d and disturbance F_1 . A desired equation of the closed current loop, which defines expected control performance, can also be described by the first order differential equation [4,5]

$$\dot{z} + \alpha_{0i_d} z = \alpha_{0i_d} i_d^*, \quad (3)$$

where i_d^* – referenced current. The equation (3) enables a type 1 astatic system for control variable, as well as smooth (with no overcontrol) current transients. Required transient time $t_n \approx 3 / \alpha_{0i_d}$, is defined only by the coefficient α_{0i_d} .

The extent to which the real current control process is close to desirable one can be estimated through the functional, which depends on inductance-normalized instantaneous energy of the magnetic field by the 1st derivation of the current.

$$G(u_d) = \frac{1}{2} [\dot{z}(t) - \dot{i}_d(t)]^2. \quad (4)$$

To minimize the functional, the gradient law of the 1st order can be used:

$$\frac{du_d(t)}{dt} = -\lambda_{i_d} \frac{dG(u_d)}{du_d}, \quad (5)$$

where λ_{i_d} – a constant.

Substituting (2) and (4) into (5), the control law for the current \dot{i}_d can be obtained

$$\dot{u}_d(t) = k_{i_d} (\dot{z} - \dot{i}_d), \quad (6)$$

where $k_{i_d} = \lambda_{i_d} / L_s$ – the gain coefficient of the controller.

A variable z in the control law (6) plays a role of a necessary derivative on the current, which can be found in real time from the equation (3) through closing feedback on the current component $z = \dot{i}_d$

$$\dot{z} = \alpha_{0i_d} (\dot{i}_d^* - \dot{i}_d). \quad (7)$$

Integrating both parts of the equation (6) and taking into account (7), the control law for the current i_d can be finally obtained:

$$\begin{aligned} u_d(t) &= k_{i_d} (z - i_d); \\ z &= \alpha_{0i_d} \int_0^t (\dot{i}_d^* - \dot{i}_d) dt. \end{aligned} \quad (8)$$

Contrary to classic controllers, the designed one does not contain parameters of the controlled object (1), and has only the parameter α_{0i_d} which defines the desired equation of the closed-loop system performance (3).

The differential equation of closed control loop of the current \dot{i}_d can be derived through substituting the control law (8) to (2):

$$\ddot{i}_d + (R_s / L_s + k_{i_d} / L_s) \dot{i}_d + (k_{i_d} \alpha_{0i_d} / L_s) i_d = (k_{i_d} \alpha_{0i_d} / L_s) \dot{i}_d^* \quad (9)$$

It demonstrates that control process is asymptotically stable. According to the Hurwitz criterion, coefficients of the equation (9) are positive $(k_{i_d} \alpha_{0i_d} / L_s) > 0$, $(R_s / L_s + k_{i_d} / L_s) > 0$. It is important that the stability of the control loop is maintained under unlimited increasing of the controller gain coefficient $k_{i_d} \rightarrow \infty$; and real (9) and designed (3) control processes are fully coincident. This is made obvious, if to divide all elements of the equation (9) by the coefficient k_{i_d} / L_s under condition $k_{i_d} \rightarrow \infty$

$$\frac{L_s}{k_{i_d}} \ddot{i}_d + \left(\frac{R_s}{k_{i_d}} + 1 \right) \dot{i}_d + \alpha_{0i_d} i_d = \alpha_{0i_d} \dot{i}_d^*. \quad (10)$$

This specificity provides the dynamic decomposition of the system (1) and the robustness to parametric disturbances. During operation, the interrelated system is broke down into relatively independent local control loops, with their transients which run in accordance with the desired performance equation (3). Clearly, if the gain coefficient of the controller is technically limited, there is a dynamic error which is set through technical requirements to the quality of control.

During the development of the current control law, a small uncompensated time constant of the power frequency convertor T_μ , which is in the closed loop, was not taken into consideration. Assessment of its influence in form of the 1st order aperiodic unit can be carried out through the 3rd order differential equation of the closed loop system which is derived similarly to (9)

$$T_\mu \ddot{i}_d + (1 + T_\mu R_s / L_s) \dot{i}_d + (R_s / L_s + k_{i_d} / L_s) i_d + (k_{i_d} \alpha_{0i_d} / L_s) i_d = (k_{i_d} \alpha_{0i_d} / L_s) \dot{i}_d^*. \quad (11)$$

According to the Hurwitz criterion, the current loop stability can be achieved under the following condition:

$$(1 + T_\mu R_s / L_s)(R_s / L_s + k_{i_d} / L_s) > T_\mu k_{i_d} \alpha_{0i_d} / L_s. \quad (12)$$

Assuming that $k_{i_d} \rightarrow \infty$, the stability condition can be finally presented as follows:

$$\alpha_{0i_d} < 1/T_\mu + R_s/L_s \quad (13)$$

Thus, the time constant of the power frequency converter T_μ limits a time response of the system, which is set by the coefficient a_{0d} .

The laws of regulation are developed similarly for other coordinates of the system.

The developed vector control system was investigated through modelling with the following parameters of the SIM IE: rated power $P_n=208$ kW; rated motor torque $M_n=663$ Nm; rated current $I_n=458$ A; rated speed $n_n=3000$ rpm. Controllers had parameters as follows: current controller I_D : $\alpha_{0id}=500$, $k_{id}=250$; CURRENT CONTROLLER I_Q : $\alpha_{0iq}=500$, $k_{iq}=260$; CURRENT CONTROLLER I_F : $\alpha_{0if}=50$, $k_{if}=250$; SPEED CONTROLLER: $\alpha_{0\omega}=150$, $k_\omega=50$.

Fig. 1a presents transients of referenced speed ω^* during the electrical drive start period. Fig. 1b presents speed tracking error under variation of the stator resistance R_s : $R_s = 0,0029 \Omega$ (rated value), $R_s = 0,00145 \Omega$ (0.5 rated value) and $R_s = 0,0058 \Omega$ (2.0 rated value). As seen, this parametric disturbance does not affect the dynamic performance of the proposed system: three transients are identical, no recognizable differences. The maximal dynamic speed error during start is not over 4 rad/s, and during the applying the load torque – 3,3 rad/s.

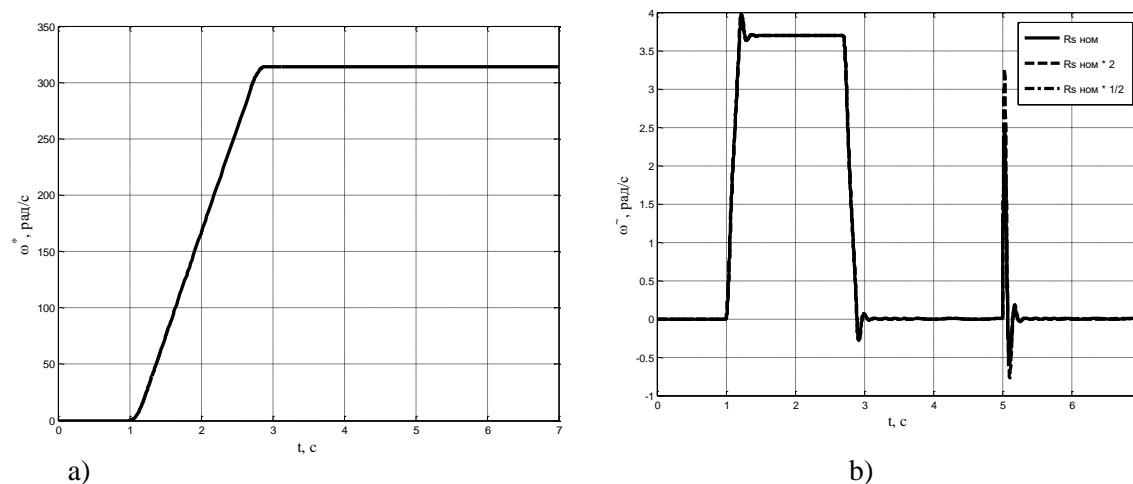


Figure 1 - Transients of referenced speed ω^* during the electrical drive start period

The results of study presented above, clearly demonstrate that the electrical drive with FRRM, designed based on the proposed methodology, has good control performance, is simple for development, and allows required operation under the parametric disturbances.

Conclusions. Proposed electrical drive based on a field regulated reluctance machine (FRRM) can be designed based on the relatively simple methodology, applying a concept of reverse task of dynamics in combination with minimization of local functionals of instantaneous values of energies. This approach allows practical development of the controllers of the electro-mechanical system which would ensure a given quality of control and adequately simple practical realization under conditions of variation of the parameters of the controlled object and the uncertainties in a mathematical model. As a result, this type of electrical drive can be recommended for further development and promotion, to be used in technological processes and installations of various industries.

References

1. Chernous'ko, F.L., Anan'evskij I.M. and Reshmin S.A. Methods of control nonlinear mechanical systems. –Moscow: Fizmatlit, 2006. – 328 p. (Rus)
2. Kozachenko V., Rusakov A., Sorokin A., Kochanov A. Switched reluctance drive – a promising direction of development of modern controlled electric drive // *Novosti teplosnabzheniya*. – 2011. – Vol. 11. – pp. 24-26. (Rus)
3. Krut'ko P. D. Robustly stable structures of control systems of high dynamic precision. Algorithms and dynamics of control of model objects // *Izvestija RAN. TiSU*. – 2005. – Vol. 2. – pp. 120-140. (Rus)

4. Ostroverkhov N., Buryk N. Control of coordinates electric drives based on the concept of inverse dynamics problems for minimization local functionals momentary values of energy // *Elektrotehnika i elektroenergetika*. – 2011. – Vol. 1. – pp. 41-49. (Rus)

5. Ostroverkhov N. Method for the synthesis of regulators of electromechanical systems based on the concept of inverse problems of dynamics in combination with the minimization of local functionals of the instantaneous motion energy values // *Vestnik NTU "KPI"*. – 2008. – Vol 30. – pp. 105-100. (Ukr)

6. Potapenko E.M., Kazurova A.E. Precision control uncertain objects. Comparison of methods of control // *Sb. nauchn. trud. Dneprodzerzhinskogo gos. techn. univer-ta*. – 2007. – pp. 353-356. (Rus)

УДК 621.3.076

М.Я. Островерхов, д-р техн. наук, проф.

В.М. Пыжов, канд. техн. наук

**Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»
ЭФФЕКТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ СИНХРОННОЙ РЕАКТИВНОЙ МАШИНОЙ С
НЕЗАВИСИМЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ**

Электрический привод на основе на синхронной реактивной машины с независимым возбуждением является хорошей альтернативой асинхронному приводу из-за ряда преимуществ, связанных с энергоэффективностью. В то же время этот тип привода также чувствителен к координатным и параметрическим возмущениям, которые могут влиять на энергоэффективность и качество управления в различных технологических процессах. В работе предложен метод управления на основе идеи обратимости прямого метода Ляпунова по исследованию устойчивости, в котором используется мгновенное значение энергии в качестве предопределенной функции Ляпунова. Это обеспечит эффективную работу с малой чувствительностью к изменениям параметров двигателя, а также простоту реализации системы управления.

Ключевые слова: управление, эффективность, синхронная реактивная машина

УДК 621.3.076

М.Я. Островерхов, д-р техн. наук, проф.

В.М. Пижов, канд. техн. наук

**Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
ЕФЕКТИВНЕ КЕРУВАННЯ СИНХРОННОЮ РЕАКТИВНОЮ МАШИНОЮ З НЕЗАЛЕЖНИМ
ЗБУДЖЕННЯМ**

Електропривод на основі синхронної реактивної машини з незалежним збудженням є однією з альтернатив асинхронному електроприводу завдяки ряду переваг, пов'язаних з енергоефективністю. В той же час цей тип електропривода також чутливий до параметричних та координатних збурень, що негативно впливає на енергоефективність та якість керування в різних технологічних процесах. В роботі запропоновано метод керування на основі ідеї зворотності прямого методу Ляпунова по дослідженню стійкості, в якому використовується миттєве значення енергії в якості заданої функції Ляпунова. Це забезпечує ефективну роботу електропривода з малою чутливістю до зміни параметрів машини, а також просту реалізацію системи керування.

Ключові слова: керування, ефективність, синхронна реактивна машина

Надійшла 26.06.2017

Received 26.06.2017

ОПТИМІЗАЦІЯ ДИНАМІЧНИХ РЕЖИМІВ ШАХТНОЇ ПІДЙОМНОЇ УСТАНОВКИ

Представлено математичну модель нечіткого регулятора, яка базується на використанні його адаптивних властивостей для заданої точності позиціонування при змінних параметрах та навантаженні, що забезпечує слабку чутливість системи керування до параметричних збурень. На основі запропонованого підходу досліджено метод виключення коливальних процесів для шахтної підйомної установки із застосуванням адаптивного нечіткого регулятора. Розроблені алгоритми управління забезпечують слабку чутливість до зміни параметрів електроприводу

Ключові слова: позиційний електропривод, нечіткий регулятор, система підпорядкованого регулювання.

При проектуванні систем керування складними електромеханічними системами, вплив на динамічний режим пружних зв'язків, ланок з запізненням, гідромеханічних пристроїв не враховується. Це призводить до порушення заданого режиму роботи, зниження енергоефективності та терміну служби окремих елементів і системи в цілому. Так, в підйомних установках глибоких шахт динамічні режими визначаються в основному пружними властивостями підйомних канатів, що викликають пружні коливання. Термін служби канатів при нормальній експлуатації становить 1-2 роки. В середньому вартість однієї вітки каната для шахт глибиною 1000 м становить 5-6 тис. у.о. Тому одним із завдань є зниження за допомогою електроприводу механічних коливань в перехідних режимах, що крім зменшення динамічних навантажень, дозволить реалізувати заданий швидкісний режим, зменшити втрати енергії і забезпечити точну зупинку робочого органу без використання механічного гальмування.

В якості засобів гасіння коливань використовуються різні муфти, пружно-демпфуючі вставки, динамічні гасителі та поглиначі енергії. Ряд досліджень вирішують задачу зменшення механічний коливань в лінії передач підйомних машин за рахунок оптимального керування електроприводом шляхом використання різних «згладжених» діаграм швидкості.

Однак введення таких коригувальних пристроїв призводить до ускладнення систем і не дає задовільних результатів у випадках, коли вихідний опис проблеми, що вирішується є неточним і неповним або в процесі роботи змінюються параметри об'єкта. Відомо, що в таких ситуаціях, завдяки своїм особливостям, найбільш конструктивним є технологія нечіткого керування.

На практиці найбільшого поширення отримали адаптивні системи керування. Недоліком таких систем є те, що більшість алгоритмів адаптації, отримані при відсутності неконтрольованих збурювальних впливів, і при неможливості визначення всіх параметрів об'єкта в процесі ідентифікації. Крім того, практично всі алгоритми адаптації працездатні, якщо протягом часу настройки регулятора відсутні збурювальні впливи. Слід також зауважити, що існуючі алгоритми адаптації досить складні в реалізації, а процес адаптації часто займає неприйнятну тривалий час.

У роботі використано підхід до оптимізації динамічних режимів шахтної підйомної установки, в основу якого покладено використання нечіткого регулятора.

Нечіткий регулятор з істотною нелінійністю становить інтерес, як у теоретичному, так і в практичному значенні. Основне завдання дослідження таких регуляторів полягає у виявленні залежності аналітичних структур найпростіших регуляторів від використаного методу виводу сигналу керування. Про якість функціонування нечіткого регулятора можна судити, використовуючи різні методи виводу, наприклад, найпоширеніші методи Мамдані R_M , Ларсона R_L та ін.

Порівняльний аналіз 12 методів виводу був проведений у контексті нечіткого керування методом комп'ютерного моделювання Mizumoto (1988) [1]. У результаті дослідження було встановлено, найкращі результати можна отримати при використанні чотирьох методів R_M, R_L, R_{DP}, R_{BP} .

З огляду на те, що математичний опис систем, заснованих на нечіткій логіці має нетрадиційний і більшою мірою якісний характер, запропоновано в керуванні електроприводом шахтної підйомної установки застосувати простий нечіткий регулятор, вихідний сигнал якого визначений аналітично за

двома вхідними сигналами, пропорційними помилці регулювання $e(nT)$ (швидкості або переміщенню) та її похідній $r(nT) = (e(nT) - e(nT - T)) / T$.

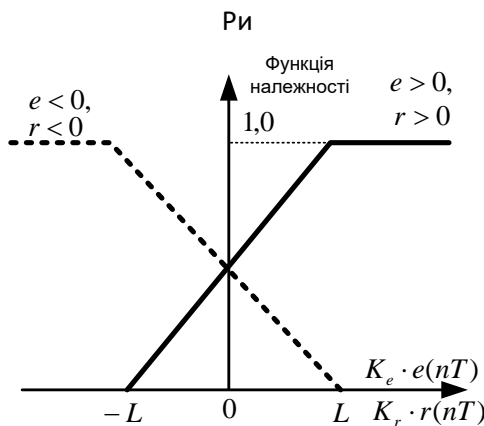
Після масштабування входи:

$$K_e \cdot e(nT) = K_e(y(nT)), \quad (1)$$

$$K_r \cdot r(nT) = K_e(e(nT) - e(nT - T)), \quad (2)$$

де K_e і K_r - коефіцієнти пропорційності, відповідно, похибки e і її похідній r , $y(nT)$ - зміна вихідного сигналу за час nT ; $e(nT - T)$ - приріст вхідного сигналу за період T . На рис. 1 - графічне представлення вхідних нечітких множин та їх похідних.

Масштабована помилка і похідна фазифіковані відповідно входу нечітких множин, функції



приналежності яких наведені на рис. 1. Всередині інтервалу $[-L...L]$ функція належності збільшується або зменшується лінійно як по відношенню до помилки, так і до її похідної. Поза діапазоном $[-L...L]$ функція належності приймає значення або 0, або 1.

Вхід нечітких множин для масштабованої позитивної та негативної помилок, описується наступними функціями належності:

$$\mu_e^+ = \frac{L + K_e \cdot e(nT)}{2L} \text{ та } \mu_e^- = \frac{L - K_e \cdot e(nT)}{2L} \quad (3)$$

$$\mu_r^+ = \frac{L + K_r \cdot r(nT)}{2L} \text{ та } \mu_r^- = \frac{L - K_r \cdot r(nT)}{2L}, \quad (4)$$

Рисунок 1

де L - максимальне значення помилки. Отже, використовується чотири нечітких правила керування, а саме:

$$\left. \begin{aligned} \text{Якщо } K_e \cdot e(nT) > 0 \text{ та } K_r \cdot r(nT) > 0, \text{ то } \Delta U(nT) > 0; \quad (r_1) \\ \text{Якщо } K_e \cdot e(nT) > 0 \text{ та } K_r \cdot r(nT) < 0, \text{ то } \Delta U(nT) = 0; \quad (r_2) \\ \text{Якщо } K_e \cdot e(nT) < 0 \text{ та } K_r \cdot r(nT) > 0, \text{ то } \Delta U(nT) = 0; \quad (r_3) \\ \text{Якщо } K_e \cdot e(nT) < 0 \text{ и } K_r \cdot r(nT) < 0, \text{ то } \Delta U(nT) < 0. \quad (r_4) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

У наведених нечітких правилах $\Delta U(nT)$ - вихід нечіткого регулятора.

Виходи нечіткого регулятора (позитивний, нульовий і негативний) подібні трапеціям. Форма трапеції визначається параметром $\theta = A/H$, який обмежується значеннями $\theta \leq 0.5$, щоб уникнути накладення між верхніми сторонами двох сусідніх вихідних нечітких множин.

Формальне визначення $\Delta U(nT)$ для чотирьох відомих методів виведення наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Метод	Визначення
R_M	$\mu \wedge F(\Delta U)$
R_L	$\mu \cdot F(\Delta U)$
R_{DP}	$\begin{cases} \mu, & F(\Delta U) = 1 \\ F(\Delta U), & \mu = 1 \\ 0, & \mu < 1, F(\Delta U) < 1 \end{cases}$
R_{BP}	$0 \vee (\mu + F(\Delta U) - 1)$

У таблиці μ - функція приналежності вихідної нечіткої множини, яка розраховується за вхідною нечіткою множиною. Площі вихідних множин для різних методів виводу обчислені за формулами табл. 2. Індексми M, L, DP і BP позначено відповідні методи виведення.

Правила контролю r_2 та r_3 створюють дві функції приналежності, а $F(\Delta U)$ є функцією приналежності вихідної нечіткої множини.

Таблиця 2

Метод виведення	Площа вихідної нечіткої множини
R_M	$S_M(\mu) = \mu(2 - \mu + \mu \cdot \theta)H$
R_L	$S_L(\mu) = \mu(1 + \theta)H$
R_{DP}	$S_{DP}(\mu) = 2\mu \cdot \theta \cdot H$
R_{BP}	$S_{BP}(\mu) = \mu(2\theta + \mu - \mu \cdot \theta)H$

Об'єднана функція приналежності

$$\mu_{r_{2\vee r_3}} = \min(\mu_{r_2} + \mu_{r_3}, 1).$$

(6)

Для дефазифікованих нечітких множин використовується метод центру ваги. Виходячи з того, що виходи нечітких множин симетричні щодо їх середніх значень ($H, 0$ і $-H$), масштабований

вихідний сигнал фазі-контролера:

$$K_U \cdot \Delta U(nT) = K_U \cdot \frac{H \cdot S(\mu_{r_1}) + 0 \cdot S(\mu_{r_{2\vee r_3}}) - H \cdot S(\mu_{r_4})}{S(\mu_{r_1}) + S(\mu_{r_{2\vee r_3}}) + S(\mu_{r_4})} = K_U \cdot H \frac{-S(\mu_{r_4}) + S(\mu_{r_1})}{S(\mu_{r_1}) + S(\mu_{r_{2\vee r_3}}) + S(\mu_{r_4})}. \quad (7)$$

На практиці розглядають зміну масштабованих помилки та її похідної в інтервалі $[-L \dots L]$, щоб у повній мірі використовувати нелінійність нечіткого контролера.

Згідно табл. 2 найпростіша модель регулятора визначається при використанні методу виведення R_L , причому величина θ може бути прийнята такою, що дорівнює нулю. В цьому випадку нечіткі множини являтимуть собою рівнобедрені трикутники, а площі активної частини $S(\mu) = \mu \cdot H$, де μ приймає значення ($\mu_r^+, \mu_r^-, \mu_e^-, \mu_e^-$ відповідно для $\mu_{r_1}, \mu_{r_2}, \mu_{r_3}$ та μ_{r_4}), визначаються за формулами (3) і (4).

З використанням цієї комбінації формула (7) набуває вигляду:

$$K_u \cdot U(\Delta T) = \frac{0,5H}{2L - K_e e(nT)} U_{ex}, \quad (8)$$

де $U_{ex} = (K_e e(nT) + K_r r(nT))$.

Залежність (8) показує, що коефіцієнт передачі регулятора залежить від помилки регулювання e : чим більша помилка, тим більший коефіцієнт передачі. Отже, завжди зі збільшенням помилки регулювання зростатиме реакція на її зменшення. У загальному вигляді такий регулятор можна представити схемою в складі замкнутої системи керування (рис. 2).

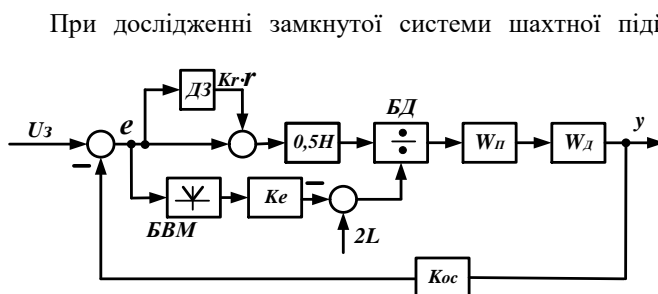


Рисунок 2 – замкнута система керування

При дослідженні замкнутої системи шахтної підйомної установки була прийнята найбільш розповсюджена система тиристорний перетворювач - двигун, математична модель якої отримана відомими методами [2]. Математичне моделювання системи було виконано з використанням пакету прикладних програм Matlab/Simulink.

Як об'єкт було використано шахтну підйомну установку з двигуном постійного струму потужністю 90 кВт, з номінальним моментом 1142,9 Н·м [3].

Характер зміни швидкості підйомної установки (1 – заданої, 2 – дійсної) при зміні статичного навантаження без нечіткого регулятора приведений на рис. 3, а, з використанням нечіткого регулятора - на рис. 3, б.

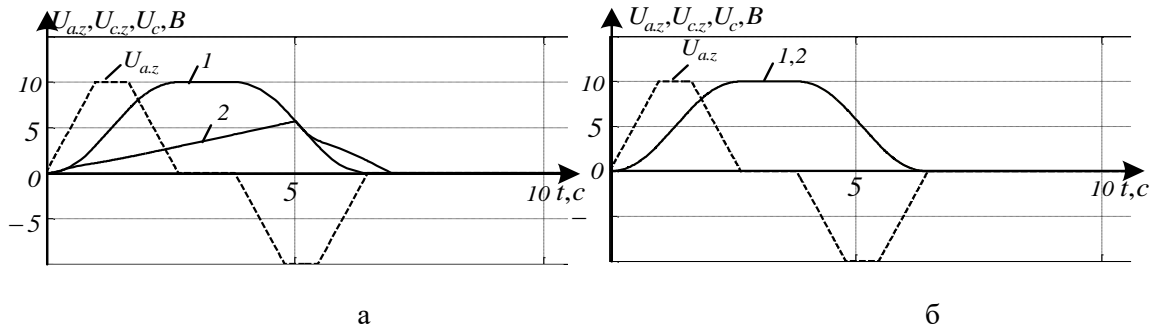


Рисунок 3-- Характер зміни швидкості підйомної установки

Дослідження якості системи керування з нечітким регулятором для позиційного електроприводу з частотно-регульованим асинхронним двигуном типу MDEMA63-42-230V потужністю 0,25 кВт проведені на експериментальній установці. Отримані показники якості керування порівнювалися з результатами, отриманими з використанням П - регулятора положення, реалізованого програмно в самому перетворювачі частоти. Функціональну схему експериментальної установки представлено на рис. 4.

До складу установки входить:

- програмований логічний контролер (ПЛК) Lenze (серії 3200С);
- перетворювач частоти (серії 8400) Vector Highline ;
- фотоімпульсний датчик швидкості (ФІД);
- електромагнітна муфта з системою управління струмом гальмування.

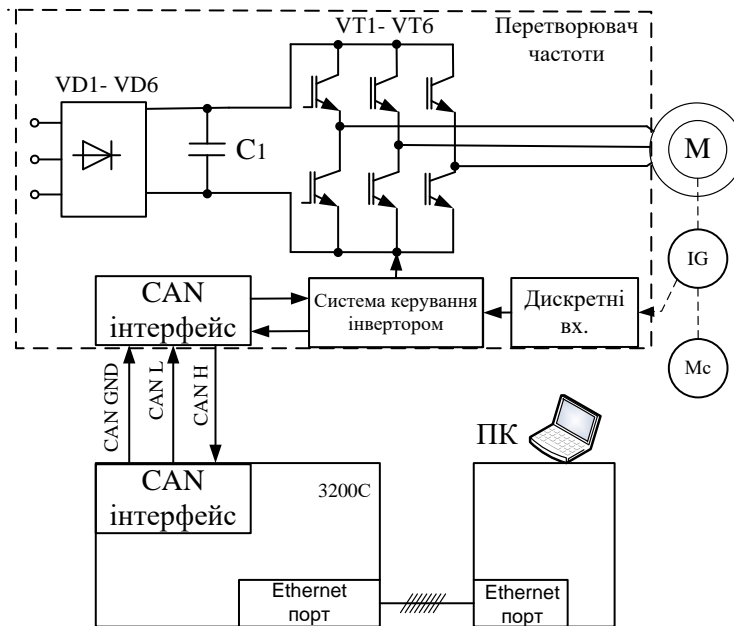


Рисунок 4 -- Функціональну схему експериментальної установки

Дослідження проводилися для $M_C = 1,35 \text{ Н} \cdot \text{м}$.

На рис. 5 наведені графіки зміни сигналів: швидкості: а - з фазі-регулятором, б - з П – регулятором при зміні статичного навантаження.

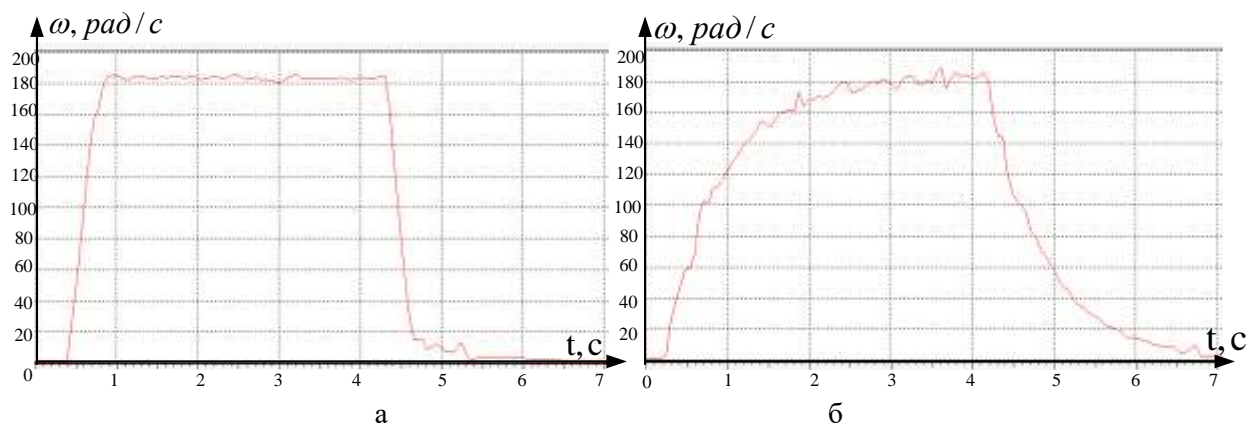


Рисунок. 5 - графіки зміни сигналів: швидкості:
а - з фазі-регулятором, б - з П – регулятором при зміні статичного навантаження.

З перехідних характеристик швидкості видно, що система з запропонованим нечітким регулятором має кращі показники якості та менш чутлива до параметричних збурень під час відпрацювання завдання у вигляді стрибка.

Також було виконано порівняння систем керування з різними типами регуляторів на прикладі шахтної підйомної установки та розраховані показники якості системи (таблиця 3).

Таблиця 3

	ПД-регулятор	Нечіткий регулятор	Feed forward control
Перерегулювання,%	2	0,2	0,26
Тривалість перехідного процесу, с	16	15	18
Інтегрований квадратичний показник якості	172,19	169,44	172,59

Висновок. Розроблена система керування позиційним електроприводом з нечіткою корекцією заданих діаграм швидкості і положення забезпечує реалізацію цих діаграм в оптимальному за швидкодією і динамічним навантаженням режимі при дії параметричних і зовнішніх збурень для любых типів систем керування.

Список використаної літератури

1. Hao Ying. The simplest fuzzy controllers using different inference methods are different nonlinear proportional-integral controllers with variable gains / Hao Ying [Text]. // Automatica, 29. – 1993/ - P. 1579–1589.
2. Ключев В.И. Теория электропривода // Энергоатомиздат. – 1985. – №9. – 560 с.
3. Босак, А. В. Позиционное управление многосвязной электромеханической системой с адаптивным фаззи-регулятором / А. В. Босак, В. М. Чермалих [Текст] // Електротехнічні та комп'ютерні системи. – 2011. - № 03(79). - С. 439-441.

A. Chermalykh, Cand.Sc. (Eng.)

A. Bosak, Cand.Sc. (Eng.)

A. Danilin, Cand.Sc. (Eng.)

**National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»
OPTIMIZATION OF DYNAMIC MODES OF MINE HOISTING PLANT**

A mathematical model of the fuzzy controller is presented, which is based on the use of its adaptive properties for a given positioning accuracy with changed parameters and load, which provides a weak sensitivity of the control system to parametric disturbances. On the basis of the proposed approach, a method for excluding oscillatory processes for a mine hoisting installation with the use of an adaptive fuzzy controller is investigated. The developed control algorithms provide a weak sensitivity of the system to changes in the parameters of the electric drive.

Keywords: position electric drive, fuzzy controller, subordinate control system.

References

1. Hao Ying. (1993) “The simplest fuzzy controllers using different inference methods are different nonlinear pro-portional-integral controllers with variable gains”, *Automatica*, 29. P. 1579–1589. (Eng.)
2. Kljuhev V.I. Theory of the electric drive // *Energoatomizdat*. – 1985. – 560 p. (Rus.)
3. Bosak, A. V., Chermalykh, V. M. Positional control of a multiply connected electromechanical system with an adaptive fuzzy controller // *Electrical and computer systems, Ukraine*, - 2011. - Pp. 439–441. (Rus.)

УДК 621.313: 62-83

О.В. Чермалых, канд. техн. наук

А.В. Босак, канд. техн. наук

О.В. Данилин, канд. техн. наук

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

ОПТИМИЗАЦИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ ШАХТНОЙ ПОДЪОМНОЙ УСТАНОВКИ

Представлена математическая модель нечеткого регулятора, которая основана на использовании его адаптивных свойств для заданной точности позиционирования при измененных параметрах и нагрузки, что обеспечивает слабую чувствительность системы управления к параметрическим возмущениям. На основании предложенного подхода исследован метод исключения колебательных процессов для шахтной подъемной установки с использованием адаптивного нечеткого регулятора. Разработанные алгоритмы управления обеспечивают слабую чувствительность системы к изменению параметров электропривода.

Ключевые слова: силовой автотрансформатор, геомагнитные индукционные токи, магнитная цепь, электрическая цепь, кривая намагничивания.

Надійшла 23.06.2017

Received 23.06.2017

В.С. Михайленко, канд. техн. наук, доц.
 Национальный Университет «Одесская Морская Академия»

А.Н. Харабет, канд. техн. наук, доц.
 Одесский Национальный Политехнический Университет

ИНТЕЛЛЕКТУАЛИЗОВАННЫЕ ОЦЕНКИ НАДЕЖНОСТИ ПАРОСИЛОВОЙ УСТАНОВКИ БОЛЬШОГО СУДНА

На концептуальном уровне рассмотрена задача разработки интеллектуализованной (нечеткой экспертной системы (НЭС)), предназначенной для повышения надежности действия судовой энергетической установки в условиях длительного плавания. Предусматривается, что НЭС должна выработать прогноз возможных ситуаций и сообщать о них оператору. Также система отслеживает поведение оператора, и при некоторых признаках его неуверенных действий может взять управление на себя или вызвать сменного оператора. В качестве аппарата принятия решений в НЭС предлагается применение нечетких сетей Петри.

Ключевые слова: морские перевозки; судовые энергетические установки; неопределенность сложных систем; нечеткие множества и алгоритмы; нечеткие сети Петри

Судовая энергетическая установка (СЭУ) – это сложный комплекс технологически взаимосвязанных элементов энергетического оборудования, машин и механизмов, с помощью которых на судне производится выработка, преобразование, передача и потребление различных видов энергии для эффективного функционирования судна. Задачей судовой энергетической установки является преобразование химической (или ядерной) энергии топлива в механическую энергию двигателя и в электрическую или тепловую энергию, потребляемую механизмами общесудового назначения и удовлетворяющую бытовые нужды персонала и пассажиров судна [1]. В состав СЭУ входят главные и вспомогательные энергетические комплексы и установки. Необходимым и важным элементом почти всех типов СЭУ является паровой котел, который выполняет как основные, так и вспомогательные ее функции. От эффективности его функционирования зависит работа главного двигателя (судового дизеля), паротурбинной (ПТУ), газотурбинной (ГТУ), судовых вспомогательных и санитарных систем. Ключевым объектом ПТУ является паровой котел, который применяются на ряде специализированных судов (контейнеровозах и пассажирских судах). Привлекательная особенность ПТУ, несмотря на среднюю энергетическую эффективность, заключается в возможности работы на относительно дешевых низкосортных топливах, а также в возможности работать в сочетании с ГТУ и дизельной установкой. Принципиальная тепловая схема паротурбинной и газотурбинной СЭУ как сложных систем показана на Рисунке 1.

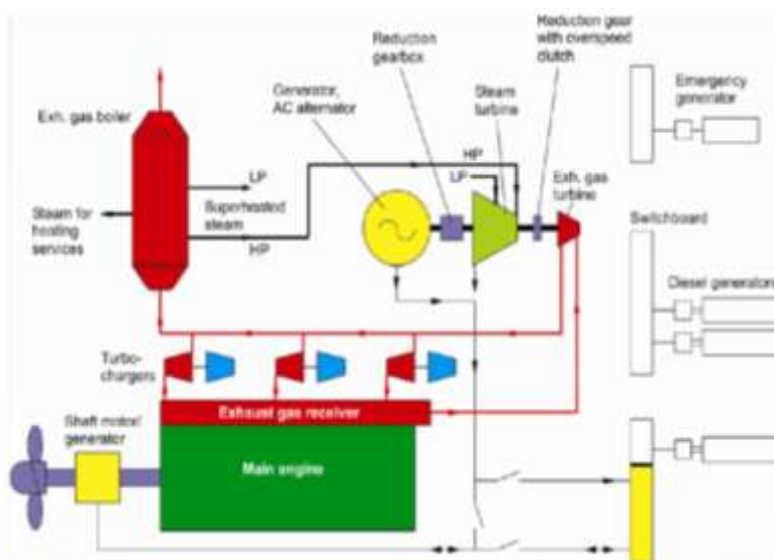


Рисунок 1 – Схема СЭУ с ПТУ и ГТУ

С целью повышения надежности и эффективности действующей установки, предназначенной, помимо привода пропульсионной системы судна, еще и для обеспечения механического привода генератора (Generator AC alternator), нами рекомендуется энерготехнологическое комбинирование. Оно заключается в использовании дополнительных газовой и паровой турбин. Данная схема позволяет добиться снижения расхода топлива и повышения к.п.д. СЭУ за счет использования отработанных газов от главного двигателя - дизеля (Main Engine) и пара с высокой температурой на выходе утилизационного парового котла (Ehx. Gas boiler). Вместе с тем, схема значительно усложняется, что требует более сложной системы управления. Также заметно возрастает нагрузка на эксплуатационный персонал, что в условиях рейса может приводить к появлению операторских ошибок в управлении.

Анализ аварий на морском флоте свидетельствует о том, что около 80 % из них происходит из-за ошибочных действий судовых и береговых специалистов. Безопасность мореплавания, наряду с другими факторами, зависит от безотказного действия судовых систем "человек-машина". Она должна рассматриваться на основе современных методов теории надежности и инженерной психологии [2]. При постепенной деградации какого-либо из узлов представленной СЭУ судовой механик может, выбирая режим работы или принимая заблаговременные меры, обеспечить включение в работу резервного оборудования и не допустить аварии. Для предотвращения внезапных отказов необходимо использовать различные методы и средства технического диагностирования. Вместе с тем, в настоящее время, проблема диагностирования работы судовых систем и оборудования полностью не решена. Существующие диагностирующие системы, ввиду недостаточности и неоднозначности информации, не указывают на **возможность отказа**, а только фиксируют его проявление [3]. Один из возможных путей дальнейшего усовершенствования систем диагностики – это применение теории нечетких множеств и нечеткой логики. Новый подход позволит создавать экспертные системы, работающие в режиме "советчика", которые используют знания, опыт и интуицию экспертов – операторов, специалистов по диагностированию возможных состояний судового оборудования. В качестве возможного использования аппарата нечетких экспертных систем (НЭС) в диагностике судового оборудования, авторами предлагается методика реализации нечеткой фаззи-системы, позволяющей проводить контроль работы технологического оборудования СЭУ в супервизорном режиме или режиме "советчика". Система удаленного мониторинга эксплуатационных показателей СЭУ на базе SCADA-систем [4] позволяет обойтись без программной разработки специального интерфейса (Рисунок 2). В свою очередь, SCADA-системы, ориентированные на создание комплексных решений автоматизации сложных производственных процессов, предоставляют гибкие средства для разработки человеко-машинного интерфейса. Сбор данных и централизованное управление с судового центрального поста управления (ЦПУ) является основным и остается наиболее перспективным способом автоматизированного управления сложными динамическими системами в жизненно важных и критичных (с точки зрения надежности и безопасности) ситуациях. А дооснащение судовых SCADA-систем (систем мониторинга) программным приложением, реализующим системы поддержки принятия решений СППР в задачах диагностики неисправности оборудования СЭУ является актуальной научно - производственной задачей.

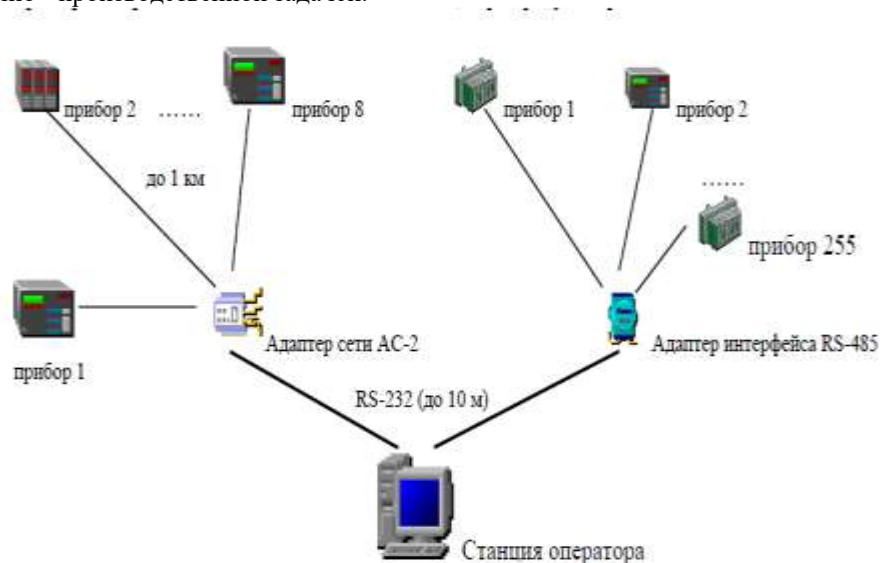


Рисунок 2 – Структурная схема судовой компьютерной системы для мониторинга надежности СЭУ

Вахтенный механик, находясь в ЦПУ и выполняя функции, связанные с контролем и дистанционным управлением СЭУ (ПТУ), руководствуется знаниями, опытом и должностными инструкциями. Для получения адекватного механизма получения нечеткого условного вывода и проверки эффективности «советов» нечеткой экспертной системы (НЭС), авторами составлена база правил нечетких продукций с рядом условий, оформленных в виде предикатов P_i [5]. Каждый предикат является высказыванием о ситуациях, возникающих при эксплуатации оборудования (в данном случае – ПТУ). Например:

- P_1 – «нагрузка электросети судна стабильна»;
- P_2 – «давление теплоносителя (рабочего тела) в системе ПТУ падает»;
- P_3 – «оператор включил НЭС»;
- P_4 – «давление теплоносителя в системе ПТУ стабильно»;
- P_5 – «в ЦПУ средства измерения исправны»;
- P_6 – «оператор включает насос подпитки котла»;
- P_7 – «оператор не включает насос подпитки котла»;
- P_8 – «оператор дважды совершил нелогичное действие»;
- P_9 – «исключена возможность аварийной ситуации»;
- P_{10} – «не исключена возможность аварийной ситуации».

Из предикатов составляются правила нечеткой продукции. Каждое из правил нечетких продукций имеет некоторый вес T_i символизирующий значимость правила или уверенность эксперта в степени истинности заключения, получаемого по отдельному правилу. Предположим, что в процессе эксплуатации сложилась текущая ситуация: «ЕСЛИ давление теплоносителя в системе ПТУ падает, И...», степень истинности нечеткого высказывания ($T=0.8$), «...И напряжение в электросети стабильно...» ($T=0.6$), «...И в ЦПУ средства измерения исправны...» ($T=0.85$), «...И оператор включил НЭС...» ($T=0.5$), «...ТО...». Результатом условного вывода в таком случае может оказаться следующая оценка текущей надежности человеко-машинной системы. Оператор не уверен в своих силах по причине усталости (продолжительный шторм, наличие в акватории большого количества судов и пр.). Он передает управление НЭС и пользуется ее решениями. Рассмотрим возможные способы решения данной задачи с помощью НЭС: а) -прямого метода вывода (fuzzy modus ponens); б) - правила max-min-композиции $(\mu_b(y) = \max\{\min\{\mu_a(x), \mu_Q(x, y)\}\})$; в) - логической конъюнкции

$T(A \wedge B) = \min\{T(A), T(B)\}$; г) - и логического отрицания: $T(\neg A) = 1 - T(A)$. Рассмотрим все эти правила для получения нечетких заключений. Правило позволяет получить заключение о том, что «оператор включает насос подпитки» со степенью истинности $T = \min(0.8, 0.9) = 0.8$. Правило 7. $T = \min(1 - 0.8, 1.0) = 0.2$ - «оператор не включает насос подпитки», правило 10. $T = \min(1 - 0.6, 0.8) = 0.4$ - «не исключена аварийная остановка», правило 3: $T = 0.6$ - «Оператор включил НЭС», правило 9: $T = \min(0.6, 0.7) = 0.6$ - «исключена возможность аварийной ситуации», правило 9: $T = \min(\min(0.8, 0.8), 0.95) = 0.8$ - «исключена возможность аварийной ситуации», правило 7: $T = \min(\min(0.8, 0.5), 0.95) = 0.5$ - «исключена возможность аварийной ситуации». Ключевое нечеткое высказывание «исключена возможность аварийной ситуации» является следствием правил 9 и 7. Степень истинности которого составляет: $T = \max(0.8, 0.5) = 0.8$. Для объективного анализа следует рассмотреть ситуацию «не исключена возможность аварийной ситуации», правила 3, 5: $T = \max(0.4, 0.6) = 0.6$.

Анализ полученных значений означает, что сложившаяся ситуация характеризуется высоким уровнем неопределенности и требует принятия дополнительных мер. В частности, НЭС может рекомендовать «своевременную замену операторов, с целью предотвращения ошибок, связанных с их усталостью». Данное решение основано на том, что высокая степень истинности (0.6) заключения «не исключена возможность аварийной ситуации» получена при использовании правила 5. Таким образом, система правил нечетких продукций позволяет не только найти оптимальное решение, но и менее строго относиться к противоречивости и неполноте информации.

СОЗДАНИЕ НСП: Для получения адекватного механизма заключения и проверки эффективности советов ЭС, представим базу правил нечетких продукций в виде нечеткой сети Петри (НСП) типа $S_f = (N, f, \lambda, m_0)$ [6]. Каждый из переходов соответствует отдельному правилу нечеткой продукции: t_1 - правил 1; t_2 – правилу 2; t_3 – правилу 4; t_4 – правилу 6; t_5 – правилу 7; t_6 – правилу 3; t_7 – правилу 5. Для проверки успешности НЭС с помощью НСП, предположим, что на диспетчерском пункте сложилась ситуация аналогичная предыдущей. Таким образом, задается вектор начальной маркировки $m_0 = (0.6, 0.8, 0.5, 0.2, 0.5, 0, 0, 0, 0)$. Данная ситуация соответствует НСП, представленной на Рисунке 3. Задача заключается в оценке наличия маркера в позициях P_9 и P_{10} . С этой целью последовательно рассматриваются все активные переходы и результаты их нечеткого срабатывания (Рисунки 3-4). Так, срабатывание активного при начальной маркировке перехода t_1 приводит к изменению маркировки в позиции P_6 которая становится равной $m_6 = 0.8$. Срабатывание перехода t_2 в позиции P_7 которая становится равной $m_7 = 0.2$. И срабатывание перехода t_3 к изменению маркировки в позиции P_8 которая становится равной $m_8 = 0.5$.

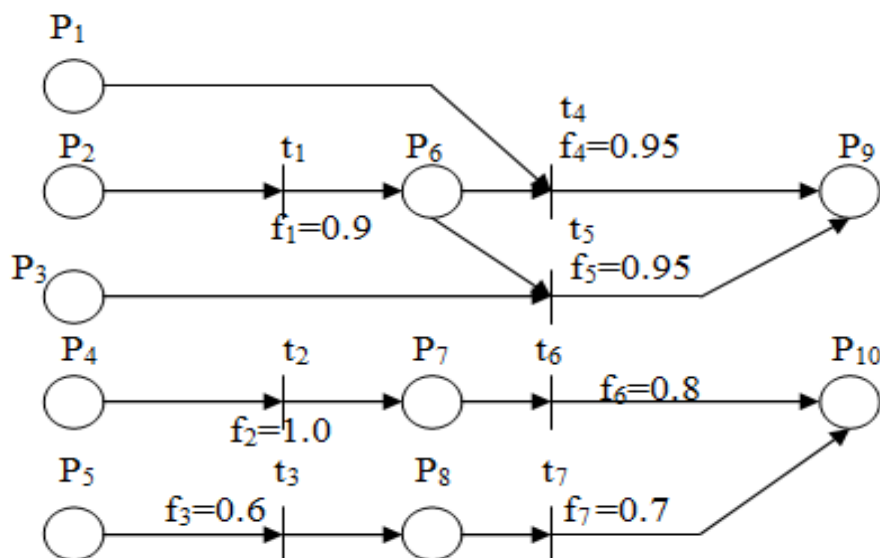


Рисунок 3 – Структура НСП для представления базы правил нечетких продукций

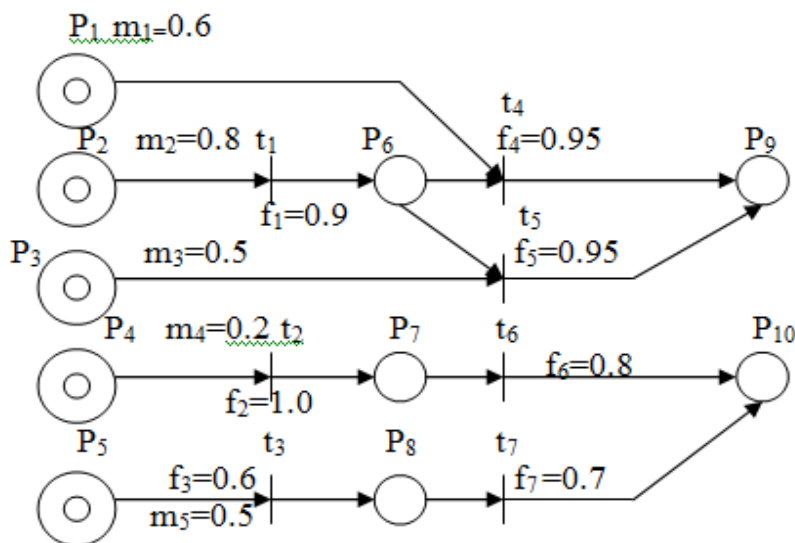


Рисунок 4 – НСП, описывающая текущую ситуацию

Новые значения маркировок приводят к активности остальных переходов. Срабатывание активного перехода t_4 к изменению маркировки в позиции P_9 которая становится равной $m_9 = 0.6$. Срабатывание активного перехода t_5 ведет к изменению маркировки в позиции P_9 которая становится равной $m_9 = 0.5$. Срабатывание активного перехода t_6 к изменению маркировки в позиции P_{10} которая становится равной $m_{10} = 0.2$, а срабатывание активного перехода t_7 к изменению маркировки в позиции P_{10} которая становится равной $m_{10} = 0.5$. Таким образом, определена новая маркировка НСП $m = (0.6, 0.8, 0.5, 0.2, 0.5, 0.8, 0.2, 0.5, 0.6, 0.5)$. Степень истинности нечеткого высказывания «исключена возможность аварийной ситуации» составляет $m_9 = 0.6$, а обратного $m_{10} = 0.5$. На основании данного вывода, система мониторинга предлагает рекомендации по увеличению m_9 . Данный совет совпадает с рекомендацией НЭС, что подтверждает адекватность предложенных авторами экспертных систем для судовых СППР.

Заключение

Достоверность решения, полученного авторами, была подтверждена с помощью имитационного моделирования в среде MatLab. Реализация метода прямого выбора правил нечетких продукций,

полученная путем заключения экспертов, а также выводов, полученных в компьютерной версии НЭС, совпадают с достаточной для практики точностью. Можно также отметить, что несомненным достоинством представления базы правил в форме НСП является наглядность и визуализация всех промежуточных результатов.

Список использованной литературы

1. Акимов П.П. Судовые автоматизированные энергетические установки. Учебник для вузов морск. трансп. - М.: Транспорт, 1980. - 352с.
2. Михайленко В. С. Нечеткая система регулирования давления пара судовой котельной установки / В. С. Михайленко, Оженко Е. М. // Холодильная техника и технология. – 2008. – № 5 (115). – С. 69-74.
3. Михайленко В.С. Нечеткие производственные экспертные системы и их взаимодействие с сетями Петри / В.С. Михайленко // Холодильная техника и технология. – 2009. – № 6 (122). – С. 78-81
4. Современная SCADA система / <https://ru.wikipedia.org/wiki/SCADA>
5. Полковникова Н.А., Курейчик В.М. Разработка модели экспертной системы на основе нечеткой логики // Известия ЮФУ. Технические науки. 2014. №1 (150). URL: <http://cyberleninka.ru/article/n/razrabotka-modeli-ekspertnoy-sistemy-na-osnove-nechyotkoy-logiki> (дата обращения: 20.02.2017).
6. Леоненков А. Ю. Нечеткое моделирование в среде Matlab и fuzzyTech / А. Ю. Леоненков. – СПб.: БХВ, 2003.

V. Mikhaylenko, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof.
National University "Odessa Maritime Academy"

A. Kharabet, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof.
Odessa National Polytechnic University

INTELLEKTUAAALOMANDI ASSESSING THE RELIABILITY OF STEAM POWER PLANT OF A LARGE SHIP

At the conceptual level, the problem of the deconstruction of the telecommunication system, the toto uncharted system of systems (IES), is recognized as the basis for the design of the ship's power plant in the conditions of the pre-gradual swimming. Predbachaetsya, scho IES moe virobljati prognoz mozhlivih situatsi ta spovishchati about them the operator. Takozh system vidstidkovuc behavior of the operator in this way, shchiobi with active signs yogo nevpvnenih diy priinyati ogranivinnyya na abo wiklikati pidminogo operatora. At the anchor aparatu priinyatty rishen at the IES proponuetsya zastosuvannya nechitkih Petri.

Keywords: maritime transport; marine power systems; uncertainty of complex systems; fuzzy sets and algorithms; fuzzy petri nets.

References

1. Akimov P. P. of Ship automated power plants. The University textbook marine. transp. – М.: Transport, 1980. – 352с.
2. Mikhailenko, V. S., Fuzzy control, steam pressure marine boiler plant / V. S. Mikhailenko, E. M. Ogenko // Refrigeration technics and technology. – 2008. – № 5 (115). – S. 69-74.
3. Mikhailenko V. S. Fuzzy rule-based expert systems and their interaction with Petri nets / V. S. Mikhailenko // Refrigeration technics and technology. – 2009. – № 6 (122). – S. 78-81
4. Modern SCADA system / <https://ru.wikipedia.org/wiki/SCADA>
5. Polkovnikova.A. Kureychik V. M. Development of model of expert system based on fuzzy logic // proceedings of the SFU. Technical Sciences. 2014. No. 1 (150). URL: <http://cyberleninka.ru/article/n/razrabotka-modeli-ekspertnoy-sistemy-na-osnove-nechyotkoy-logiki> (date accessed: 20.02.2017).
6. Leonenkow, A. Fuzzy modeling in Matlab and fuzzyTech / A. Leonenkow. – SPb.: Byhwd, 2003. – 720 p

Надійшла 20.03.2017
Received 20.03.2017

О.М. Сінчук, д-р техн. наук, проф.

В.А. Кольсун, канд. техн. наук, доц.

Д.В. Риженков, аспірант, В.М. Макодзьоб, аспірант

Державний вищий навчальний заклад «Криворізький національний університет»

ДВОЛАНКОВИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ ЧАСТОТИ, ЯК ДЖЕРЕЛО ГАРМОНІК SMART-МЕРЕЖ

Досліджені електромагнітні процеси у первинній ланці дволанкових перетворювачів частоти, побудованих на інверторах напруги. Здійснений математичний опис процесів, що характеризують перервний, неперервний, граничнонеперервний та граничноперевні режими. Встановлена відмінність між останніми двома режимами. У точці граничного режиму виявлена розривність математичних функцій інтегральних показників, у тому числі – коефіцієнту зсуву та коефіцієнту спотворення струму. У зоні малих навантажень спостерігається значне зростання відносних гармонік струму та коефіцієнтів зсуву та спотворення мережевого струму дволанкових перетворювачів частоти

Ключові слова: дволанковий перетворювач частоти, мережевий струм, гармоніки струму, коефіцієнт спотворення, коефіцієнт зсуву.

Вступ. Розвиток промисловості держави пов'язаний з інтенсивним впровадженням нових технологій, які вимагають від систем електроприводу значно вищі показники, що висувуються до швидкодії, діапазону регулювання швидкості, точності регулювання, енергетичних показників та ін. Більшості з названих характеристик відповідають системи електроприводу, побудованих на перетворювачах частоти. Найбільш розповсюдженими в промисловості, включаючи і гірничо-видобувну, набули дволанкові перетворювачі з некерованим випрямлячем та інвертором напруги. Незважаючи, що питанням енергоефективності перетворювачів частоти присвячені чисельні роботи, зокрема [1,2,5], та низка питань залишається малодослідженою.

Постановка проблеми. У багатьох випадках, зокрема в гірничо-металургійному комплексі, спостерігається одночасна робота декількох перетворювачів частоти (ПЧ) на одну мережу (рис.1,а). Питання електромеханічного й енергетичного зв'язку територіально розосереджених електроприводів, оцінки їх взаємного впливу є дуже важливими для потужних агрегатів, зв'язаних загальною мережею живлення. Режими роботи окремо взятих електроприймачів впливають на сусідні, що призводить до певних наслідків технологічного характеру. Основними задачами, що висувують автори - є вивчення впливу окремих ПЧ на мережу живлення. Враховуючи те, що первинна ланка частотних перетворювачів до мережі має однакову топологію (рис. 1,а) (фактично некеровані перетворювачі з ємнісним навантаженням), то їх сумісний вплив на мережу можна аналізувати звичайним підсумовуванням складових потужності, гармонік струму, не впливаючи суттєво в такому випадку на точність кінцевих розрахунків.

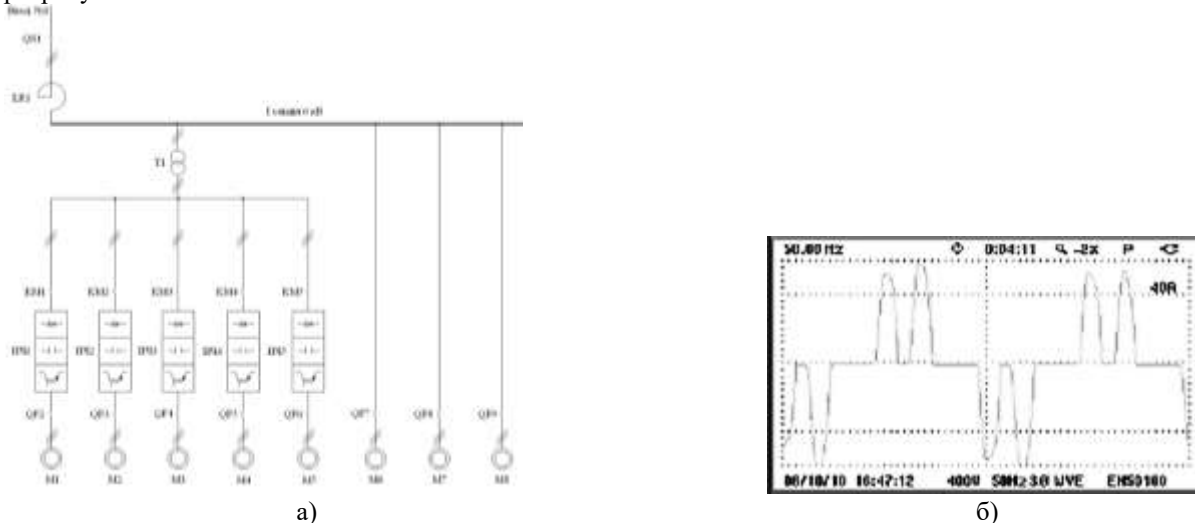


Рисунок 1 – Однолінійна схема живлення секції 1 підстанції №22 РЗФ-2 ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» (а) та мережевий струм 6-пульсного випрямляча перетворювача частоти (б)

Тобто, подальший аналіз енергетики, а саме гармонічного складу мережевого струму окремого перетворювача, охарактеризує роботу групи таких перетворювачів стосовно мережі живлення. Огляд літературних джерел, щодо аналізу роботи ПЧ стосовно мережі живлення, показує, що автори або взагалі уникають цього питання, або наводять результати експериментальних досліджень [2] (рис. 1,б), або результати, отримані шляхом математичного моделювання [4], або математичні вирази основані на спектральному аналізі [3], лишаючи поза увагою аналітичний викладення. Такий підхід, звісно, приховує ряд цікавих аспектів, з точки зору розуміння перетікання електромагнітних та електроенергетичних процесів у різних навантажувальних режимах роботи ПЧ.

Результати дослідження. Як уже зазначалося, найбільшого розповсюдження набули перетворювачі частоти (ПЧ) за топологією: некерований випрямляч – ємність – інвертор напруги (рис. 1,а, рис. 2,а). Дослідження зосередженні саме на електромагнітних та енергообмінних процесах між мережею, некерованим випрямлячем, ємністю та навантаженням. Останнє буде представлено усередненою моделлю інвертора напруги з асинхронним двигуном.

Якщо, навіть, розглядати випрямляч за трифазною нульовою схемою, починають виникати складнощі, щодо виведення аналітичних виразів, які б дозволили провести аналіз й сформулювати глибоке розуміння явищ, що відбуваються в досліджуваному об'єкті. Так, наприклад, рівняння, які описують електромагнітні процеси для фази А мають вигляд:

$$\begin{aligned} i_A &= i_{C_d} + I_{di}; \\ e_A &= L_{Net} \frac{di_A}{dt} + R_{Net} i_A + U_{C_d}; \\ i_{C_d} &= C_d \frac{dU_{C_d}}{dt}, \end{aligned}$$

де i_A – мережевий струму випрямляча фази А; $e_A = U_m \sin \omega t$ – напруга мережі фази А; i_{C_d} – струм ємності перетворювача; I_{di} – усереднений струм навантаження (інвертор напруги з асинхронним двигуном); U_{C_d} – напруга на ємності перетворювача частоти; C_d – ємність перетворювача; L_{Net} – індуктивність мережі, включаючи індуктивність мережевих дроселів; R_{Net} – опір мережі, включаючи опір мережевих дроселів.

Уже в такому випадку автори отримали на стільки громіздкі вирази (у статті результуючі вирази не наводяться), які не піддаються для подальшого спектрального аналізу, що втрачається будь-який сенс використання аналітичних розрахунків, і назрівають думки, щодо проведення досліджень за допомогою імітаційного моделювання.

Зневаживши редакційними вимогами стосовно дати видання використовуваної літератури, автори звернулися до джерела майже 50-ти річної давності [7], де детально розглянуті електромагнітні процеси що перетікають у керованих перетворювачах на навантаження з проти-ЕРС за різних режимів: режим неперервного струму, режим перервного струму, режим граничного струму. Звісно, що безпосередньо таку методику не можна використовувати для розглядуваного випадку, тому автори взяли її за основу, і, враховуючи, особливості роботи дволанкового перетворювача частоти, у тому числі й некерованість випрямляча, здійснили відповідний аналіз, що викладений далі по тексту.

Режим перервного струму перетворювача характеризується тим, що кутова тривалість протікання струму λ виявляється меншою, ніж $2\pi/m$ (m – пульсність перетворювача). У цьому випадку, проти-ЕРС у ланцюгу навантаження дорівнює U_{C_d} . Базуючись на рис. 2,б для граничного режиму роботи перетворювача, який є окремим випадком режиму перервного струму, приймаючи за початок відліку часу момент відкриття чергового вентиля, можна записати поточне значення струму навантаження:

$$\begin{aligned} i_d &= \frac{E_{Net} m}{\omega_0 (L_d + L_{Net})} \int_0^{\omega_0 t} \sin\left(\omega_0 t + \frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{m} + \alpha\right) d\omega_0 t - \frac{U_{C_d}}{L_d + L_{Net}} t = \frac{E_{Net} m}{\omega_0 (L_d + L_{Net})} \times \\ &\times \left[\sin\left(\frac{\pi}{m} - \alpha\right) - \sin\left(\frac{\pi}{m} - \alpha - \omega_0 t\right) \right] - \frac{U_{C_d}}{L_d + L_{Net}} t, \end{aligned} \quad (1)$$

де $E_{Net\ m}$ – амплітуда напруги мережі живлення; $\omega_0=2\pi f$, f – частота мережі живлення; α – кут відкриття діодів, обумовлений тим, що діоди будуть відкриватися не в час переходу лінійних напруг через нуль, а в момент рівності фазної напруги напрузі на ємності і визначається з виразу:

$$U_{C_d} = E_{Net\ m} \cos\left(\frac{\pi}{m} - \alpha\right). \quad (2)$$

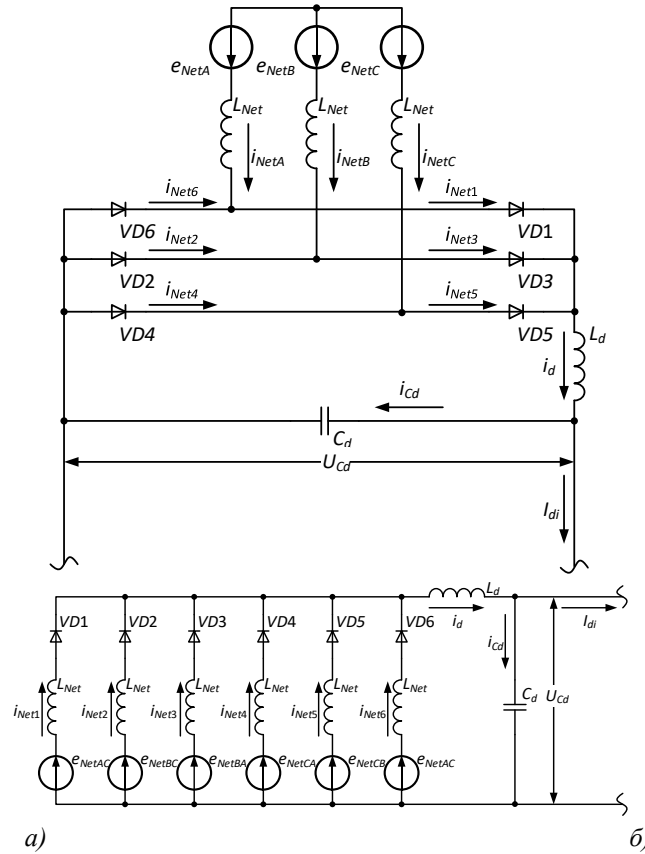


Рисунок 2 – Схема некерованого випрямляча (а) та її схема заміщення (б) згідно [7]

Записавши рівняння (1) з урахуванням (2), та враховуючи, що в момент часу $\omega_0 t = \lambda$ (λ – тривалість струму) миттєве значення випрямленого струму випрямляча $i_d=0$ [7]:

$$\sin\left(\lambda + \alpha - \frac{\pi}{m}\right) - \sin\left(\alpha - \frac{\pi}{m}\right) - \lambda \cos\left(\frac{\pi}{m} - \alpha\right) = 0. \quad (3)$$

Після деяких перетворень, рівняння (3) набуває вигляду:

$$\cos\left(\alpha - \frac{\pi}{m}\right) \left[\operatorname{tg}\left(\alpha - \frac{\pi}{m}\right) \cdot [\cos \lambda - 1] + \sin \lambda - \lambda \right] = 0. \quad (4)$$

Розв’язок (4) стосовно α :

$$\alpha_1 = \frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{m};$$

$$\alpha_2 = \frac{\pi}{m} - \operatorname{arctg}\left(\frac{\sin \lambda - \lambda}{\cos \lambda - 1}\right). \quad (5)$$

Перший результат необхідно відхилити, як принципово неможливий для такого типу перетворювачів, і для подальших розрахунків залишається другий результат (5), тобто:

$$\alpha = \frac{\pi}{m} - \operatorname{arctg}\left(\frac{\sin \lambda - \lambda}{\cos \lambda - 1}\right). \quad (6)$$

Нижче (рис. 3), наведений графік залежності $\alpha(\lambda)$, для мостового трифазного випрямляча ($m=6$).

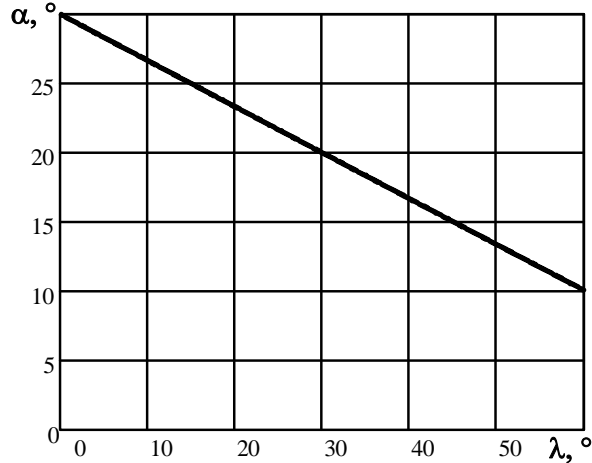


Рисунок 1 – Залежність кута відкриття діодів випрямляча від тривалості струму для режиму перервного струму

Як видно з рис. 3, навіть за некерованого трифазного мостового випрямляча, у режимі перервного струму кут відкриття діодів відмінний від нуля і коливається в межах 10,08–30°, що, як можна сподіватися, призведе до погіршення коефіцієнту зсуву (споживання реактивної потужності), хоча ці процеси й відбуваються за низького рівня навантаження.

Напруга на ємності визначатиметься з (2) та (6):

$$U_{C_d} = E_{Net\ m} \cos\left(\arctg\left(\frac{\sin \lambda - \lambda}{\cos \lambda - 1}\right)\right). \quad (7)$$

Рівняння струму, враховуючи (7), (6) та (1):

$$i_d = \frac{E_{Net\ m}}{\omega_0(L_d + L_{Net})} \left[\sin\left(\arctg\left(\frac{\sin \lambda - \lambda}{\cos \lambda - 1}\right)\right) - \sin\left(\arctg\left(\frac{\sin \lambda - \lambda}{\cos \lambda - 1}\right) - \omega_0 t\right) \right] - \frac{E_{Net\ m} \cos\left(\arctg\left(\frac{\sin \lambda - \lambda}{\cos \lambda - 1}\right)\right)}{L_d + L_{Net}} t. \quad (8)$$

З урахуванням виразу (8) побудований графік мережевого струму перетворювача i_{Net} (рис. 4).

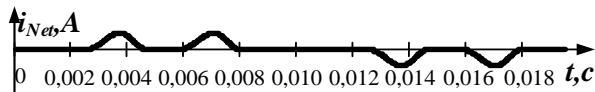


Рисунок 4 – Графік мережевого струму випрямляча перетворювача частоти у режимі перервного струму

Граничний режим можна поділити на два режими: режим граничноперервного струму (рис. 5,а,б) та режим граничнонеперервного струму (рис. 5,в,г). Відмінність полягає у тому, з якої сторони іде наближення до граничного режиму: у першому випадку – з режиму перервного струму, а у другому – з режиму неперервного струму.

Як видно з рис. 5,а–г, форма мережевого струму i_{Net} має відмінність, й таким чином у граничній точці ($\lambda=2\pi/m$, для мостової схеми $\lambda=2\pi/6=\pi/3$) функції гармонік струму, коефіцієнтів зсуву, коефіцієнтів спотворення, коефіцієнтів гармонік матимуть розрив, що зображено на рис. 5,д,е.

Дослідження неперервного режиму струму для подібного класу перетворювачів проведені багатьма авторами, як вітчизняними так і інших країн. Й фактично спектральний гармонік мережевого струму коливається з деякою похибкою у достатньо визначених границях [6].

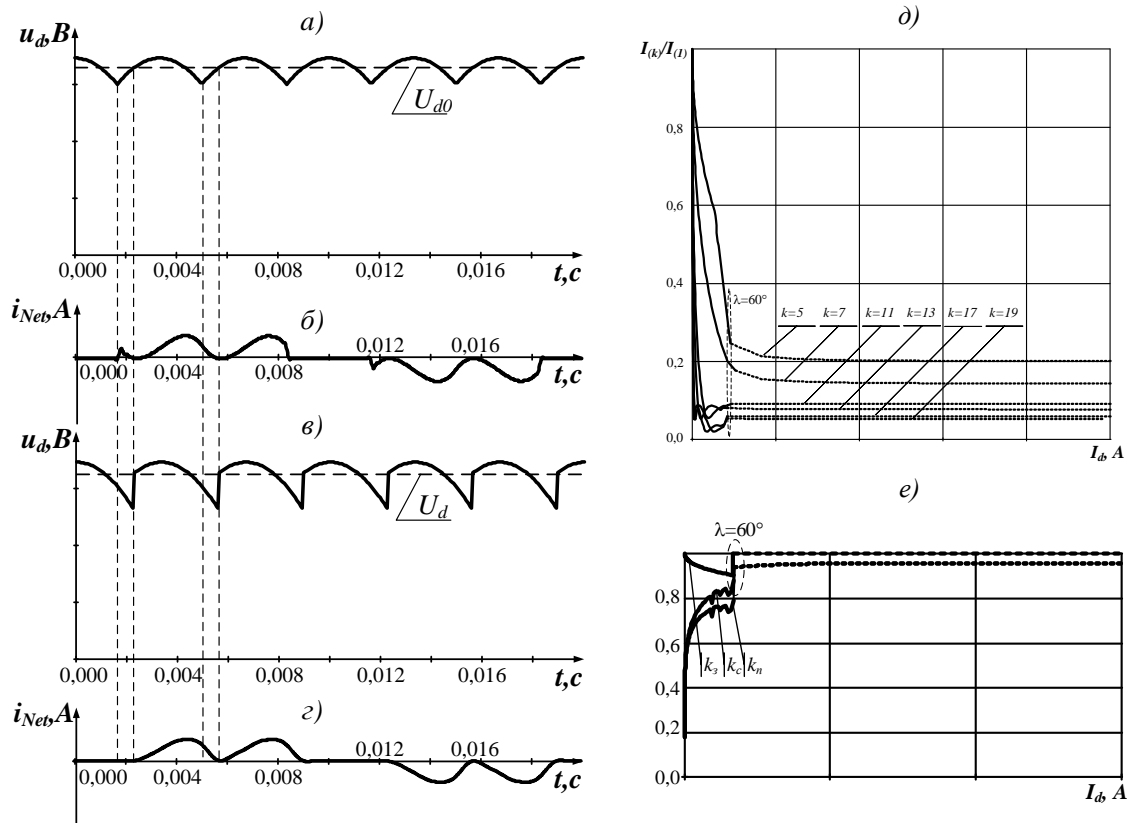


Рисунок 1 – Діаграми вихідної напруги перетворювача та мережевого струму за граничнонеперервного (а,б) та граничноперервного режиму (в,г), відносні гармоніки мережевого струму i_{Net} від рівня навантаження перетворювача (д) та коефіцієнт зсуву k_z , коефіцієнт спотворення k_c і коефіцієнт потужності k_n в залежності від рівня навантаження (е)

Висновки.

- 1) Проаналізувавши електромагнітні процеси, що перетікають від мережі живлення до ланки постійного струму перетворювача частоти, встановлено, що гармоніки струму у режимі перервного струму значно перевищують рівні, що характерні для режиму неперервного струму.
- 2) У граничному режимі спостерігається розрив функцій гармонік струму та коефіцієнтів спотворення, зсуву і потужності.

Список використаної літератури

1. Авдєєв І.В. Вплив на показники якості електроенергії вхідної індуктивності мережі, що живить частотно-регульований привод / [І.В. Авдєєв, О.В. Немикіна, О.М. Климко та ін.] // Електротехніка та електроенергетика. – №1, 2012. — С. 51–57.
2. Барутсков І.Б. Гармонические искажения при работе преобразователей частоты / И.Б. Барутсков, С.А. Вдовенко, Е.В. Цыганков // Главный энергетик. – №6, 2011. – С. 5 – 15.
3. Жежеленко І.В. Электромагнитная совместимость потребителей : монография / [И.В. Жежеленко, А.К. Шидловский, Г.Г. Пивняк и др.]. – М.: Машиностроение, 2012. – 351.
4. Кольсун В.А. Електроенергетичні характеристики перетворювачів частоти в аспекті розвитку альтернативної енергетики / [В.А. Кольсун, Д.В. Риженков, В.М. Макодзьоб, О.М. Кулик] // Матеріали конференції «Розвиток промисловості та суспільства». – Т.1. – 2016. – 271 С.
5. Пичкур Е.В. Управление установкой электроцентробежных насосов с преобразователем частоты по критерию влияния на качество электрической сети / Е.В. Пичкур, В.В. Козлов // Вестник кибернетики. – №12, 2013. – С. 37–42.
6. Сінолицький А.П. Аналітичні наближення в розрахунках енергетичних показників / А.П. Сінолицький, В.А. Кольсун, М.В. Жуйков // Збірник наукових праць Дніпродзержинського державного технічного університету (технічні науки). Тематичний випуск «Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія й практика»/ Дніпродзержинськ: ДДТУ, 2007. – С. 562 – 563.
7. Шитилло В.П. Автоматизированный вентильный электропривод / В.П. Шитилло. — М.: 1969. — 400 с.

О.Н. Синчук, д-р техн. наук, проф.

В.А. Кольсун, канд. техн. наук, доц.

Д.В. Рыженков, аспирант, В.Н. Макождеб, аспирант

Государственное высшее учебное заведение «Криворожский национальный университет»
ДВУХЗВЕННЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ЧАСТОТЫ, КАК ИСТОЧНИК ГАРМОНИК SMART-СЕТЕЙ

Исследованы электромагнитные процессы в первичном звене двухзвенных преобразователей частоты, построенных на инверторах напряжения. Осуществлено математическое описание процессов, характеризующих прерывистый, непрерывный, граничнонепрерывный и гранично-прерывистый режимы. Установлено отличие между последними двумя режимами. В точке граничного режима обнаружен разрыв математической функций интегральных показателей, в том числе – коэффициента сдвига и коэффициента искажения сетевого тока двухзвенных преобразователей частоты

Ключевые слова. двухзвенный преобразователь частоты, сетевой ток, гармоника тока, коэффициент искажения, коэффициент сдвига.

O. Sinchuk, Dr. Eng. Sc., Prof.

V. Kolsun, Cand.Sc. (Eng.), Assoc. Prof.

D. Ryzhenkov, postgraduate student, V. Makojob, postgraduate student

State Institution of Higher Educational "Kryvyi Rih National University"

INDIRECT POWER CONVERTER AS A SOURCE OF HARMONICS IN A SMART GRID

Investigated electromagnetic processes in the primary level of two-frequency converters, built on the inverter voltage. Implemented mathematical description of the processes that characterize intermittent, continuous, boundary-continuous and boundary-discontinuous modes. Set the difference between the last two modes. At the boundary point mode discovered the discontinuity in mathematical functions of integral indicators, including displacement power factor and distortion power factor of the SMART grid current indirect power converters

Keywords: maritime transport; marine power systems; uncertainty of complex systems; fuzzy sets and algorithms; fuzzy petri nets.

References

1. Avdeev I.V. Influence of input inductance of mains supplying frequency-controlled drive on power quality / [I.V. Avdeev, O.V. Nemykina, A.N. Klymko etc]. // *Elektrotehnika ta elektroenergetyka*. – №1, 2012. – P. 51–57.
2. Barutcu I. B. Harmonic distortion in operating frequency converters / I. B. Barutcu, S. A. Vdovenko, E. V. Tsygankov // *Glavnyj Energetik*. – No. 6, 2011. – P. 5– 15. (Rus.)
3. Zhezhelenko I.V. Electromagnetic compatibility of consumers : monograph / [I. V. Zhezhelenko, A.K. Shidlovsky, G.G. Pivnyak etc]. – M.: Mashinostroenie, 2012. – 351 p. (Rus.)
4. Kolsun V.A. Electroenergetics factors of indirect power convertors in aspect of development of alternative energy / [V.A. Kolsun, D.V. Ryzhenkov, V.M. Makojob, O.M. Kulyk] // *Materialy Konferentsii "Rozvytok promyslovosti ta suspilstva"*. – Vol. 1. – 2016. – 271 p. (Ukr.)
5. Pichkur Ye.V. The control of an electric submersible pump unit with frequency converter with a focus on influencing the quality of electric main / Ye.V. Pichkur, V.V. Kozlov // *Vestnyk kybernetyky*. – №12, 2013. – P. 37–42. (Rus.)
6. Sinolitsyj A.P. Analytic approximations in the calculation of energy factors / A.P. Sinolitsyj, V.A. Kolsun, M.V. Zhuikov // *Zbirnyk naukovykh prac' Dniprodzerzhyn'skogo derzhavnogo tehničnogo universytetu (tehnični nauky)*. Tematychnyj vypusk «Problemy avtomatyzovanogo elektroprivoda. Teorija j praktyka»/ Dniprodzerzhyn'sk: DDTU, 2007. – P. 562 – 563. (Ukr.)
7. Shipillo V.P. Automated valve electric drive / V.P. Shipillo. – M.: 1969. – 400 p. (Rus.)

Надійшла 26.03.2017

Received 26.03.2017

ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ ENERGY SYSTEMS AND COMPLEXES

УДК 621.31

Є. Є. Чайковська, канд. техн. наук, старш. наук. співроб.
Одеський національний політехнічний університет

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ СИСТЕМИ ПІДТРИМКИ ФУНКЦІОНУВАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМ НА РІВНІ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ

Запропоновано математичне обґрунтування інтелектуальної системи підтримки функціонування енергетичних систем на основі прогнозування зміни параметрів технологічного процесу. Так, наприклад, з використанням запропонованої інтелектуальної системи розроблено інтегровану систему оцінки зміни вологовмісту повітря в сушильній камері щодо виробництва пелетного палива, яка дозволяє приймати рішення на зміну витрати повітря, що подається на підігрів, на основі зміни частоти обертання електродвигуна повітряного вентилятора, при вимірюванні температури повітря на виході із сушильної камери. Так, наприклад, на основі запропонованої інтелектуальної системи розроблено інтегровану систему підтримки температури місцевої води щодо підтримки сушки деревини при вимірюванні температури газів та температури зворотної води на вході в теплообмінник другого контуру когенераційної системи. Прийняття рішень на зміну кількості пластин теплообмінника в узгодженні із зміною частоти обертання електродвигуна повітряного вентилятора дозволяє підтримувати співвідношення виробництва електричної енергії та теплоти, що, наприклад, в умовах функціонування когенераційної системи потужністю 115 кВт при виробництві 5,8 тис. т пелет з деревини в рік знижує собівартість виробленої енергії до 20–30 %.

Ключові слова: інтелектуальна система, прогнозування параметрів, прийняття рішень

Вступ. Реалізація виробленої енергії за “зеленим тарифом” при використанні біопалива як відновлюваного джерела енергії є однією з переваг когенераційних технологій щодо виробництва електричної енергії та теплоти від одного первинного джерела енергії [1, 3]. В умовах підтримки співвідношення виробництва електричної енергії та теплоти щодо ресурсу та енергозбереження необхідно прогнозувати зміну параметрів технологічного процесу, а не ліквідувати наслідки їх зміни [3, 4].

Основна частина. З використанням методологічного та математичного обґрунтування архітектури експертних систем, методології математичного опису динаміки енергетичних систем та метода графа причинно-наслідкових зв'язків [3, 4] запропоновано математичне обґрунтування інтелектуальних систем щодо прогнозування зміни параметрів технологічного процесу:

$$IS = \left\{ \begin{array}{l} (D(P(\tau), MM(z, \tau), AI(\tau), C(\tau), LC(\tau)) \\ \langle x_0(\tau), x_1(\tau), x_2(\tau), f(\tau), K(\tau), y(\tau), d(\tau), FI(\tau) \rangle, \\ LMD(\tau), MD(\tau), NC(\tau), S(\tau), LS(\tau) \\ \langle f(\tau), K(\tau), y(\tau), d(\tau), FI(\tau) \rangle \\ P(\tau)), R(\tau), (P_i(\tau) \langle x_1(\tau), f_i(\tau), K_i(\tau), y_i(\tau) \rangle), \end{array} \right\} \quad (1)$$

де IS – інтелектуальна система; D – динамічна підсистема – енергетична система; P – властивості елементів інтелектуальної системи; MM – математичне моделювання динаміки зміни параметра, що прогнозується; AI – еталонна інформація; C – контроль працездатності енергетичної системи; LC – логічні відносини щодо контролю працездатності енергетичної системи; z – координата довжини, м; τ – час, с; x – впливи; f – параметри, що вимірюються; K – коефіцієнти математичного опису; y – вихідні параметри; d – динамічні параметри; FI – функціональна підсумкова інформація; LMD – логічні відносини щодо прийняття рішень; MD – прийняття рішення; NC – нові умови функціонування; S – ідентифікація стану енергетичної системи; LS – логічні відносини щодо ідентифікації стану енергетичної системи. Індеси: i – число елементів інтелектуальної системи; 0, 1, 2 – початковий режим, зовнішній, внутрішній характер впливів

Так, наприклад, у виробництві пелетного палива витрати на сушку деревини складають до 25 % від загальних витрат. Вміст вологи не повинен перевищувати 10 – 12 %, а сира деревина може містити близько 50 % води. В роботі [2], наприклад, визначено перевагу механічної активації матеріалу, що висушується, але за рахунок додаткових витрат на електричну енергію. В роботі [5] визначено, що на якість сушки впливають конструктивні параметри сушильної камери, але оцінка проведена при вимірюванні параметрів сушки в сушильній камері, що у зв'язку із складністю вимірів має недостовірне використання. В роботі [6] визначено вплив режимних параметрів сушки на якість сушки, але без узгодження температурного та аеродинамічного режимів сушіння матеріалу. В роботах [8, 9] видані рекомендації щодо інтенсифікації теплообміну в сушильній камері, але без можливості їх використання в реальних умовах функціонування сушильної установки. Для підтримки потужності сушки деревини використовують діагностичні системи, що базуються на вимірюванні температури повітря та його вологості в сушильній камері при вимірюванні вологості деревини. Складність вимірів та неможливість використання у єдності може привести до незворотного накопичення вологи деревиною чи припинення процесу сушки [7, 10]. У зв'язку з цим, в роботі [4] з використанням формули (1) розроблена технологія функціонування сушильної установки у складі когенераційної системи щодо виробництва пелетного палива, яка дозволяє підтримувати підігрів повітря в теплообміннику, що входить до її складу, при вимірюванні температури повітря на виході із сушильної камери. Використання розробленої інтегрованої системи оцінки зміни вологовмісту повітря в сушильній камері, здобутої на основі математичного та логічного моделювання у складі когенераційної системи, надає можливість виконувати зміну витрати повітря, що подається на підігрів, на основі зміни частоти обертання електродвигуна повітряного вентилятора та забезпечувати своєчасну подачу висушеної деревини та завантаження свіжого матеріалу (табл. 1).

Таблиця 1– Інтегрована система підтримки функціонування сушильної установки

Час, τ , 100 с	Зміна вологовмісту повітря в сушильній камері	Δw (τ) / $\Delta w_{\text{ст. розр. верх.}}$ (τ)	$w(\tau)$, %
11	Завантаження свіжої деревини. Прийняття рішення на подачу 1,8 кг/с повітря: $t_{\text{в.вих}}=55^{\circ}\text{C}$; $t_{\text{в.вх}}=85^{\circ}\text{C}$	-1	12
22	Подача 1,8 кг/с повітря. Сушка деревини: $t_{\text{в.вих}}=54^{\circ}\text{C}$; $t_{\text{в.вх}}=84^{\circ}\text{C}$	-0,9107	14,5
33	Подача 1,8 кг/с повітря. Сушка деревини: $t_{\text{в.вих}}=53^{\circ}\text{C}$; $t_{\text{в.вх}}=82^{\circ}\text{C}$	-0,8048	17,46
44	Прийняття рішення на подачу 1,68 кг/с повітря: $t_{\text{в.вих}}=52^{\circ}\text{C}$; $t_{\text{в.вх}}=80,5^{\circ}\text{C}$	-0,7544	18,87
55	Ідентифікація нових умов функціонування: подача 1,68 кг/с повітря: $t_{\text{в.вих}}=52^{\circ}\text{C}$; $t_{\text{в.вх}}=80,5^{\circ}\text{C}$	-0,7532	18,87
66	Подача 1,68 кг/с повітря. Сушка деревини: $t_{\text{в.вих}}=51^{\circ}\text{C}$; $t_{\text{в.вх}}=76,6^{\circ}\text{C}$	-0,5674	24,07
77	Прийняття рішення на подачу 1,65 кг/с повітря: $t_{\text{в.вих}}=51^{\circ}\text{C}$; $t_{\text{в.вх}}=76,6^{\circ}\text{C}$	-0,5778	24,36
88	Ідентифікація нових умов функціонування: подача 1,65 кг/с повітря: $t_{\text{в.вих}}=51^{\circ}\text{C}$; $t_{\text{в.вх}}=76,6^{\circ}\text{C}$	-0,5778	24,36
99	Подача 1,65 кг/с повітря. Сушка деревини: $t_{\text{в.вих}}=50^{\circ}\text{C}$; $t_{\text{в.вх}}=76^{\circ}\text{C}$	-0,4801	27,10
110	Подача 1,65 кг/с повітря. Сушка деревини: $t_{\text{в.вих}}=48^{\circ}\text{C}$; $t_{\text{в.вх}}=75^{\circ}\text{C}$	-0,3021	32,08
121	Подача 1,65 кг/с повітря. Сушка деревини: $t_{\text{в.вих}}=45^{\circ}\text{C}$; $t_{\text{в.вх}}=75^{\circ}\text{C}$	-0,1277	36,96
132	Вивантаження висушеної деревини на виробництво пелетного палива: $t_{\text{в.вих}}=44^{\circ}\text{C}$; $t_{\text{в.вх}}=74^{\circ}\text{C}$	-0,0190	40

де, $t_{\text{в.вих}}$, $t_{\text{в.вх}}$ – температура повітря на виході із сушильної камери та на вході в сушильну камеру, відповідно, $^{\circ}\text{C}$; w – вологовміст повітря в сушильній камері, %. Індекс: ст. розр. верх. – стале, розрахункове значення параметра першого рівня функціонування

Для підтримки співвідношення виробництва електричної енергії та теплоти у складі когенераційної системи з використанням формули (1) розроблено інтегровану систему зміни температури місцевої води другого контуру когенераційної системи щодо забезпечення сушки деревини при безперервному вимірюванні температури газів на вході в теплообмінник та температури зворотної води (рис. 1).

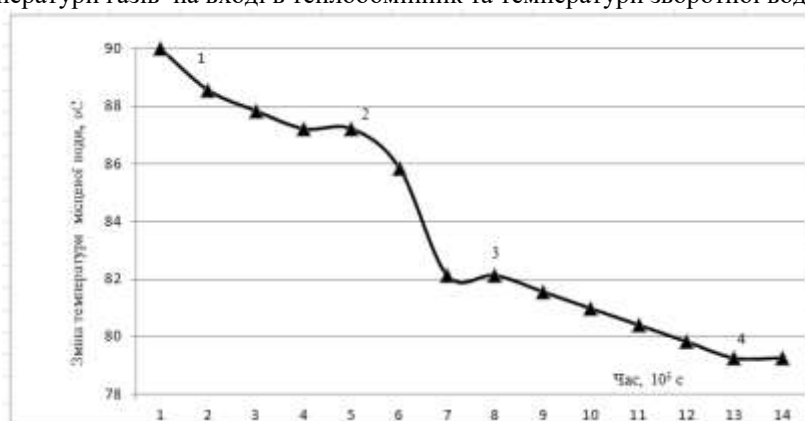


Рисунок 1 – Інтегрована система зміни температури місцевої води другого контуру когенераційної системи

Оцінка зміни температури місцевої води дозволяє приймати рішення на зміну поверхні теплообміну теплообмінника впродовж терміну сушки деревини та підтримувати відвантаження висушеної деревини та завантаження свіжого матеріалу. Так, наприклад, рівень підтримки зміни температури місцевої води 1 (рис. 1) забезпечує підігрів 1,8 кг/с повітря в термін часу від завантаження свіжої деревини до підігріву повітря до 82°C. Прийняття рішення на зменшення частоти обертання двигуна повітряного вентилятора щодо зміни витрати повітря, що подається на підігрів з 1,8 кг/с до 1,68 кг/с (табл.1) відповідає зниженню температури газів на вході з теплообмінник другого контуру когенераційної системи з 140°C до 134°C та зниженню температури зворотної води з 60°C до 56°C. В цей термін часу прийнято рішення на зміну кількості пластин теплообмінника з 36 на 44 щодо входження в допуск рівня функціонування 2 (рис. 1) когенераційної системи для підтримки температури місцевої води, що подається на підігрів повітря. При подальшому зменшенні частоти обертання електродвигуна повітряного вентилятора впродовж терміну сушки деревини та відповідному прийняттю рішень на зміну витрати повітря на підігрів (табл. 1) здобута інтегрована система зміни температури місцевої води (рис.1) дозволяє на основі прийняття рішень на зміну кількості пластин теплообмінника виконувати зміну рівня функціонування 2 на рівень функціонування 3. В термін часу 13200 с при температурі повітря, що подається на підігрів на рівні 74 °C, прийняття рішення на відвантаження висушеної деревини відповідає зміні температури газів на вході в теплообмінник другого контуру когенераційної системи – 120 °C та температурі зворотної води – 55°C. Встановлення рівня функціонування 4 (рис.1) підтримує завершення процесу сушки деревини та надає можливість входження в допуск рівня функціонування 1 щодо зміни кількості пластин теплообмінника з 52 до 36 для підтримки підігріву повітря щодо сушки завантаженої свіжої деревини (рис. 1).

Висновки. Прогнозування зміни вологовмісту повітря в сушильній камері та температури місцевої води в другому контурі когенераційної системи при використанні розробленої інтелектуальної системи дозволяє підтримувати співвідношення виробництва електричної енергії та теплоти щодо узгодження прийняття рішень на зміну частоти обертання електродвигуна повітряного вентилятора щодо зміни витрати повітря, що подається на підігрів повітря, із прийняттям рішень на підтримку температури місцевої води щодо забезпечення температурного режиму підігріву повітря. В умовах функціонування когенераційної системи, наприклад, номінальною потужністю 115 кВт можливо, при виробництві 5,8 тис. т пелет з деревини в рік, здобути грошову економію при використанні пелетного палива для опалення та гарячого водопостачання до 40 % та знизити собівартість виробленої енергії в межах 20–30 %.

Список використаної літератури

[1] Гелетуша, Г.Г. Биоэнергетика в Украине: современное состояние и перспективы развития. Часть 2 [Текст] / Г.Г. Гелетуша, Т.А. Железная, П.П. Кучерук, Е.Н. Олейник, А.В. Трибой // Промышленная теплотехника. – 2015. – Т. 37, № 3. – С. 65–73. – ISSN 0204-3602.

- [2] Трошин А.Г. Развитие процессов и оборудования для производства топливных брикетов из биомассы [Текст] / А.Г. Трошин, В.Ф. Моисеев, И.А. Тельнов, С.И. Завинский // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2010. – № 8/45 (3). – С. 36–40. – ISSN 1729-3774.
- [3] Чайковська Є.Є. Розробка енергозберігаючої технології підтримки функціонування біодизельної установ-ки у складі когенераційної системи. [Текст] / Є.Є. Чайковська // Восточно-Европейский журнал передовых тех-нологий – 2016. – № 1/8 (79). – С.4 – 11. – ISSN 1729-3774. – doi: 10.15587/1729-4061.2016.59479.
- [4] Чайковська Є.Є. Development of energy-saving technology maintaining the functioning of a drying plant as a part of the cogeneration system [Text] / Є.Є.Чайковська// Восточно-Европейский журнал передовых технологий. –2016. – Т. 3, № 8 (81). – С.42–46. –ISSN 1729-3774. – doi: 10.15587/1729-4061.2016.72540.
- [5] Bhattarai Sujala. Simulation Study for Pneumatic Conveying Drying of Sawdust for Pellet Production [Text] / Sujala Bhattarai, Jae-Heun Oh, Seung-Hee Euh, Dae Hyun Kim, Liang Yu // Drying Technology. – 2014. – Vol. 32.–p. 1142 – 1156. –ISSN 0737-3937.–doi:10.1080/07373937.2014.884575.
- [6] Laurila, Jussi. Compression drying of energy wood [Text] /Jussi Laurila, Havimo Mikko, Lauhanen Risto // Fuel Processing Technology. – 2014. – Vol. 124. – p. 286 – 289. –ISSN 0378-3820.–doi:10.1016/j.fuproc.2014.03.016.
- [7] Perre, Patrick. Drying of Wood: Principles and Practices [Text] / Patrick Perre, Roger Keeey // Handbook of Industrial Drying. – 2014. – p. 797 – 846. –ISSN 978-1-4665-9665-8. – doi: 10.1201/b17208-44.
- [8] Yuping, Liu. Application of the self-heat recuperation technology for energy saving in biomass drying system [Text] / Liu Yuping, Aziz Muhammad, Kansha Yasuki, Bhattacharya Sankar, Tsutsumi Atsushi // Fuel Processing Tech-nology. – 2014. – Vol. 117. – p. 66 – 74. –ISSN 0378-3820. – doi: 1016/j.fuproc.2013.02.007.
- [9] Wang, Hai-tao. Study of Immune PID Controller for Wood Drying System [Text] / Hai-tao Wang, Heming Jia //2013 International Conference on Communication Systems and Network Technologies. – 2013. – p. 827 – 831. –ISBN 1-4673-5603-9. –doi:10.1109/csnt.2013.176.
- [10] Zhongfu, Tian. Research on control system of wood drying based on BP Neural Network [Text] / Tian Zhongfu, Li Yuehua // Proceedings 2013 International Conference on Mechatronic Sciences, Electric Engineering and Comput-er(MEC).–2013.– p. 36–38. –ISBN 4-4799-2564-3. –doi: 10.1109/mec.2013.6885046.

УДК 621.31

Е.Е. Чайковская, канд. техн. наук, ст. науч. сотр.

Одесский национальный политехнический университет

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ НА УРОВНЕ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ

Предложено математическое обоснование интеллектуальной системы поддержки функционирования энергетических систем на основе прогнозирования изменения параметров технологического процесса. Так, например, с использованием предложенной интеллектуальной системы разработана интегрированная система оценки изменения влагосодержания воздуха в сушильной камере по производству пеллетного топлива, которая позволяет принимать решения на изменение расхода воздуха, подаваемого на подогрев, на основе изменения частоты вращения электродвигателя воздушного вентилятора, при измерении температуры воздуха на выходе из сушильной камеры. Так, например, на основе предложенной интеллектуальной системы разработана интегрированная система поддержания температуры местной воды для сушки древесины при измерении температуры газов и температуры обратной воды на входе в теплообменник второго контура когенерационной системы. Принятие решений на изменение количества пластин теплообменника в соответствии с изменением частоты вращения электродвигателя воздушного вентилятора позволяет поддерживать соотношение производства электрической энергии и теплоты, что, например, в условиях функционирования когенерационной системы мощностью 115 кВт при производстве 5,8 тыс.т пеллет из древесины в год снижает себестоимость производимой энергии до 20-30%.

Ключевые слова: интеллектуальная система, прогнозирование параметров, принятие решений

INTELLECTUAL SYSTEMS FOR SUPPORT OF ENERGY SYSTEMS FUNCTIONING AT LEVEL OF DECISION-MAKING

The mathematical substantiation of the intellectual system for supporting the functioning of energy systems based on the forecasting of changes in the parameters of the technological process is proposed. For example, using the proposed intellectual system, an integrated system for estimating the change in air moisture content in a drying chamber for the production of pellet fuel has been developed, which allows decisions on the change in the air flow rate for heating, on the basis of a change in the speed of the electric motor of the air fan at measuring the air temperature at the outlet from the drying chamber. So, for example, based on the proposed intellectual system, an integrated system for maintaining the temperature of local water for drying wood was developed when measuring the temperature of the gases and the temperature of the return water at the inlet to the heat exchanger of the second circuit of the cogeneration system. The decision to change the number of plates of the heat exchanger in accordance with the change in the speed of the electric motor of the air fan makes it possible to maintain the ratio of the production of electric energy and heat, which, for example, in the operation of a cogeneration system with a capacity of 115 kW for the production of 5.8 thousand tons of wood pellets in year reduces the cost of produced energy to 20-30%.

Key words: intellectual system, forecasting of parameters, decision-making.

References

- [1] Heletuha, H. H. Bioenergy in Ukraine: Current State and Prospects for Development. Part 2 [Text] / H. H. Geliez-naia, T. A. Gelieznaia, P. P. Kuchtruk, E. N. Olienic, A. B. Triboi // *Promyshlennaja teplochnika*. – 2015. – T. 37, № 3. – C. 65–73. – ISSN 0204-3602 (Rus).
- [2] Trohin, A. H. Development of processes and equipment for the production of fuel pellets from biomass [Text] / A. H. Trohin, V. F. Moisieiev, I. A. Telnov, S. I. Zavinski // *Vostochno-Evropejskij zhurnal peredovich tehnologij*. – 2010. – № 8/45 (3). – C. 36–40. – ISSN 1729-3774 (Rus).
- [3] Chaikovskaya, E. E. The development of energy-saving technology support operation of biodiesel plant of the composition of cogeneration system [Text] / E. E. Chaikovskaya, // *Vostochno-Evropejskij zhurnal peredovich tech-nologij*. – 2016. – № 1/8 (79). – C.4 – 11. – ISSN 1729-3774. – doi: 10.15587/1729-4061.2016.59479 (Ukr).
- [4] Chaikovskaya, E. E. Development of energy-saving technology maintaining the functioning of a drying plant as a part of the cogeneration system [Text] / E. E. Chaikovskaya // *Vostochno-Evropejskij zhurnal peredovich tehnologij* – 2016. – T. 3, № 8 (81). – C.42–46. –ISSN 1729-3774. – doi: 10.15587/1729-4061.2016.72540 (Engl).
- [5] Bhattarai, Sujala. Simulation Study for Pneumatic Conveying Drying of Sawdust for Pellet Production [Text] / Sujala Bhattarai, Jae-Heun Oh, Seung-Hee Euh, Dae Hyun Kim, Liang Yu // *Drying Technology*. – 2014. – Vol. 32.–p. 1142 – 1156. –ISSN 0737-3937.–doi:10.1080/07373937.2014.884575.
- [6] Laurila, Jussi. Compression drying of energy wood [Text] /Jussi Laurila, Havimo Mikko, Lauhanen Risto // *Fuel Processing Technology*. – 2014. – Vol. 124. – p. 286 – 289. –ISSN 0378-3820.–doi:10.1016/j.fuproc.2014.03.016.
- [7] Perre, Patrick. Drying of Wood: Principles and Practices [Text] / Patrick Perre, Roger Key // *Handbook of Industrial Drying*. – 2014. – p. 797 – 846. –ISSN 978-1-4665-9665-8. – doi: 10.1201/b17208-44.
- [8] Yuping, Liu. Application of the self-heat recuperation technology for energy saving in biomass drying system [Text] / Liu Yuping, Aziz Muhammad, Kansha Yasuki, Bhattacharya Sankar, Tsutsumi Atsushi // *Fuel Processing Tech-nology*. – 2014. – Vol. 117. – p. 66 – 74. –ISSN 0378-3820. – doi: 1016/j.fuproc.2013.02.007.
- [9] Wang, Hai-tao. Study of Immune PID Controller for Wood Drying System [Text] / Hai-tao Wang, Heming Jia // 2013 International Conference on Communication Systems and Network Technologies. – 2013. – p. 827 – 831. –ISBN 1-4673-5603-9. –doi:10.1109/csnt.2013.176.
- [10] Zhongfu, Tian. Research on control system of wood drying based on BP Neural Network [Text] / Tian Zhongfu, Li Yuehua // *Proceedings 2013 International Conference on Mechatronic Sciences, Electric Engineering and Comput-er(MEC)*.–2013.– p. 36–38. –ISBN 4-4799-2564-3. –doi: 10.1109/mec.2013.6885046.

Надійшла 20.03.2017

Received 20.03.2017

ВПЛИВ СОНЯЧНИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ НА НИЗЬКОВОЛЬТНІ РОЗПОДІЛЬНІ МЕРЕЖІ

Проаналізовано показники електромагнітної сумісності підключеної до низьковольтної мережі сонячної електростанції. Згідно з вимірними експериментально миттєвими значеннями струмів і напруг, які генеруються за допомогою сонячних електростанцій, обчислено струми вищих гармонік. Результати вимірювання показали, що наявність фотоелектричних систем у мережі може призвести до зниження параметрів якості напруги живлення, таких як коливання напруги, коефіцієнтів гармонічних спотворень, флікера напруги і коефіцієнта потужності. Зроблено порівняння допустимих значень основних параметрів електричної енергії з експериментальними даними. Показано ймовірність виникнення коливних енергообмінних процесів та необхідність експериментального визначення імпедансу мережі.

Ключові слова: сонячна електростанція, інвертор, показники якості, електромагнітна сумісність, реактивна потужність, енергоефективність.

Зростаючий попит на сонячні електростанції, крім користі для навколишнього середовища, зумовив розгляд фахівцями-енергетиками питання щодо впливу даних електростанцій на якість електроенергії та надійність енергосистеми. Підключення до мережі фотоелектричних джерел, які мають у своєму складі інвертори, може призвести до збільшення втрат, зміни перетоку потужностей, ферорезонансу, флікера напруги, втрати координації системи захисту, а як наслідок – до відключень споживачів. Крім того, фотоелектричні системи можуть спричиняти гармонійні складові, а варіації сонячної радіації можуть викликати коливання потужності генерування і напруги.

Стабільність в мережі може досягатись за допомогою Smart Grid, які ефективно керують процесами виробництва і споживання електроенергії з отриманням максимальної вигоди від наявних ресурсів. Для нового покоління сонячних інверторів PV необхідно збільшувати рівень інтелектуалізації при інтеграції в мережу за рахунок збільшення кількості контрольованих параметрів та уникнення режимів з низькою ефективністю та електромагнітною сумісністю. Також при підключенні сонячної електростанції до енергосистеми необхідно проводити попереднє математичне моделювання режимів роботи при різних параметрах мережі, а за можливості – експериментальні дослідження на наявність гармонічних спотворень. Ускладнює процес моделювання динамічна зміна параметрів джерела генерації та навантаження, що найбільше проявляється в локальних мережах. В цілому, система інвертор-мережа може бути представлена за допомогою еквівалентної схеми, зображеної на рисунку 1.

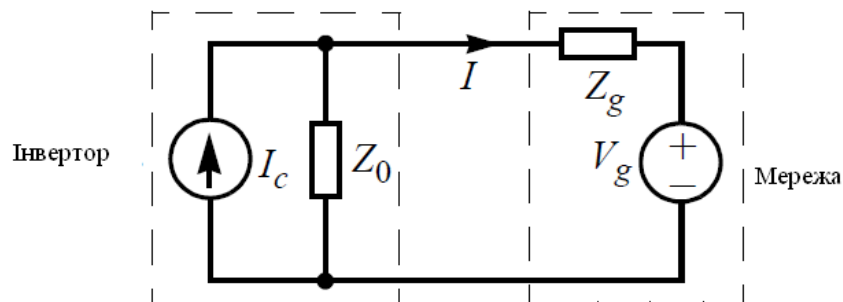


Рисунок 1 – Схема заміщення інвертора та мережі

На підставі еквівалентної схеми, вихідний струм перетворювача, який може бути перетворений

$$I(s) = \frac{I_c(s)Z_0(s)}{Z_0(s) + Z_g(s)} - \frac{V_g(s)}{Z_0(s) + Z_g(s)}, \quad (1)$$

$$I(s) = \left[I_c(s) - \frac{V_g(s)}{Z_0(s)} \right] \cdot \frac{1}{1 + \frac{Z_g(s)}{Z_0(s)}} \quad (2)$$

Проте при домінуванні в мережі нелінійного навантаження дані рівняння не завжди адекватні і не можуть бути використані при резонансах та інших високочастотних явищах. Також даний «імпедансний метод» не може бути застосований для однофазних сонячних джерел локальної генерації, тому рекомендовано використовувати методи аналізу сигналів «гармонійної лінеаризації».

$$Z_p(s) = \frac{\frac{H_i(s)V_{dc}}{2} + sL}{1 - \frac{1}{2}T_{PLL}(s \pm j2\pi f_1) \left[H_i(s) \frac{V_{DC}}{V_1} \frac{I_1}{2} e^{j\phi} \right]} \quad (3)$$

де $H_i(s)$ - передавальна функцію ємнісного струму, L - вихідна індуктивність, V_{dc} - напруга шини постійного струму, T_{PLL} - коефіцієнт посилення петлі фази автопідстроювання частоти (ФАПЧ), який використовується для синхронізації з мережею, I_1 , Φ - амплітуда і фазовий кут вихідного струму.

Даний метод дозволяє аналізувати криві струму залежно від характеристик перетворювача. Для більш повного аналізу пропонується симулятор з експериментальними дослідженнями та можливістю моделювання режимів мережі, застосовуючи генератори гармонійних спотворень. Такі вимірювання дозволять відобразити наявні процеси при різних частотах [1].

При дослідженні роботи сонячної електростанції потужністю 4 МВт у селі Радча на Прикарпатті за допомогою переносного інформаційно-вимірювального апаратно-програмного комплексу (ІВАПК) було проаналізовано енергетичні показники на шинах 0,4 кВ однієї з ТП 1000 кВА, яка віддає сонячну енергію в мережу. Розроблений вимірювальний пристрій побудований за допомогою застосування технології віртуальних приладів і середовища графічного програмування LabVIEW має в складі ноутбук та конструктивно завершені вузли з нормованими метрологічними характеристиками (три давачі напруги CV3-1000 та три давачі струму типу струмових кліщів з аналоговим виходом АТА-2502, які приєднані до входів 16-розрядного АЦП NI USB-6210). Останній за допомогою шини USB з'єднується з портативною ЕОМ із встановленим програмним забезпеченням, яке реалізує зчитування інформації з АЦП, розрахунок і візуалізацію ПЯЕ та розроблений інтерфейс. Програмне забезпечення містить велику кількість підпрограм стандартних алгоритмів цифрової обробки сигналів (швидке перетворення Фур'є, визначення середньоквадратичного значення, цифрові фільтри та ін.), підпрограм візуалізації інформації та записування у файл на жорсткому диску ЕОМ, а також інтерфейс віртуального приладу та блок-схеми, яка є алгоритмом його функціонування.

Вимірювання проводилися в серпні при максимальному рівні сонячної інсоляції, проте вироблення електроенергії супроводжувалося відключеннями певних груп інверторів, які відбувалися спонтанно і впливали на кількість виробленої активної потужності. На рисунку 2 зображено графік зміни активної потужності сонячного джерела (в кожній фазі та сумарне), який умовно можна розділити на чотири періоди. На першому етапі відбувається вироблення електроенергії всіма групами інверторів (480 кВт), що супроводжується значними коливаннями величини виробленої енергії. На наступному етапі ми відімкнули половину навантаження і отримали практично прямолінійний графік виробітку електроенергії (350 кВт). На третьому етапі було ввімкнено 4/6 навантаження, в результаті чого величина виробленого навантаження зросла до 400 кВт, а графік залишився прямолінійним. На четвертому етапі ввімкнено 5/6 навантаження, що несуттєво збільшило величину виробленої електроенергії, а коливання величини виробленої електроенергії повернулося на попередній рівень. Інтенсивність коливання збільшується зі зростанням активної потужності генерування [2].

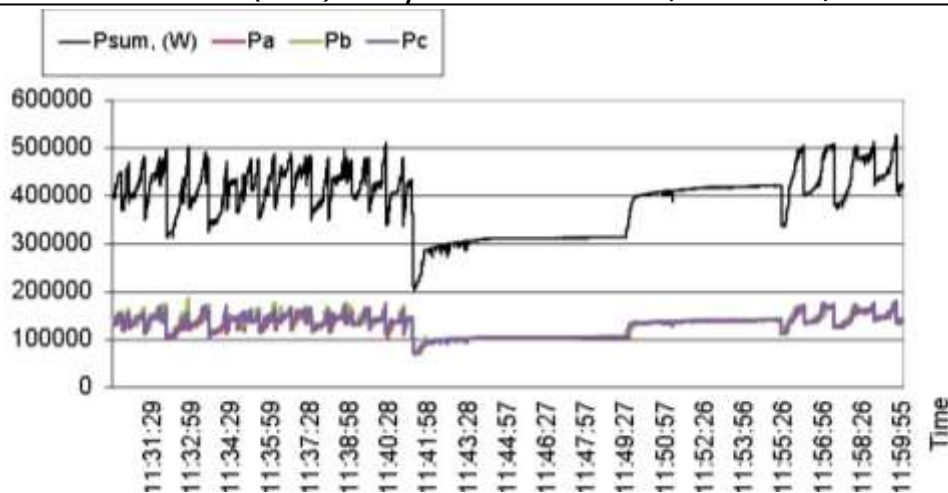


Рисунок 2 – Графік зміни активних потужностей на шинях 0,4 кВ підстанції сонячної електростанції

Експериментально доказано, що правильний вибір трансформатора та його групи з'єднання має важливу роль при сумісній роботі джерела генерації з мережею, які необхідно враховувати власникам електростанції. При зміні групи з'єднання трансформаторів на даній електростанції інвертори перестали відмикатися і потужність генерації зросла до номінальної.

На рисунку 3 зображено графік зміни реактивну потужність зсуву $Q = UI_1 \sin \varphi_1$, яку можна компенсувати конденсаторними батареями, синхронними компенсаторами або недовантаженими синхронними електродвигунами в режимі перезбудження, та реактивну потужність спотворення

$T = U \sqrt{\sum_{i=2}^n I_i^2}$, яка спричинена вищими гармоніками струму і для компенсації якої необхідні спеціальні

фільтро-компенсувальні пристрої. Реактивна потужність зсуву в даному випадку має від'ємний характер, а піки практично симетричні з піками потужності спотворення. Рівень споживаної реактивної потужності зсуву практично незмінний, але має різкі зміни під час відключення частини інверторів та за інших перехідних процесів.

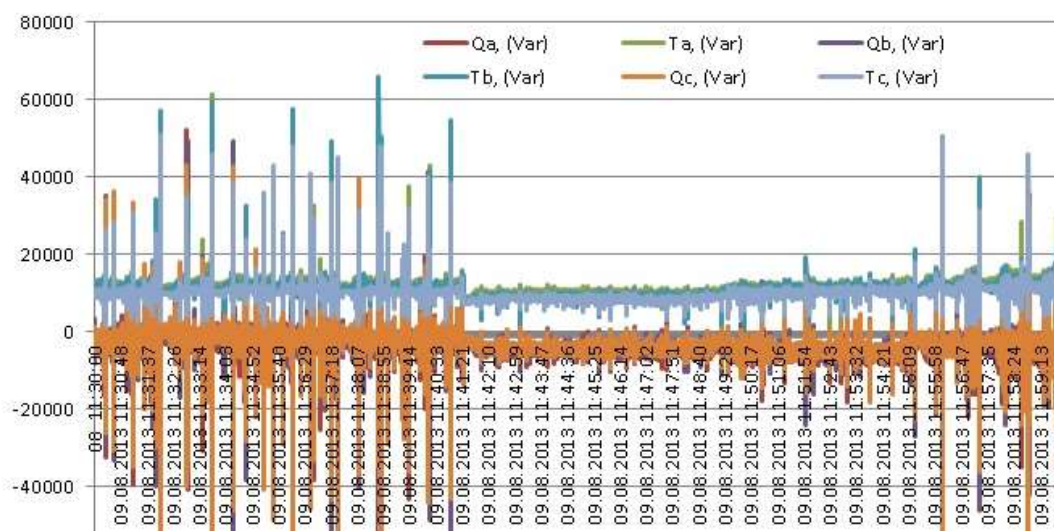


Рисунок 3 – Графіки зміни реактивної потужності зсуву та спотворення

Проаналізувавши зміну миттєвих значень напруг і струмів в трьох фазах, зміни частоти струму інвертора та аналіз гармонійного складу струмів фази А інвертора за допомогою середовища LabVIEW

було розроблено підпрограми пофрагментної обробки сигналу для розрахунку коефіцієнтів несиметрії та несинусоїдності. При вимірюваннях на затискачах підстанції сонячної електростанції коефіцієнт несиметрії струму досягав в окремі періоди 17 %, що перевищує допустиме значення. При цьому коефіцієнт несиметрії напруг не перевищував 5 %. Напруга має чітко виражену синусоїдну форму, натомість в формі струму фази А присутні гармонійні складові.

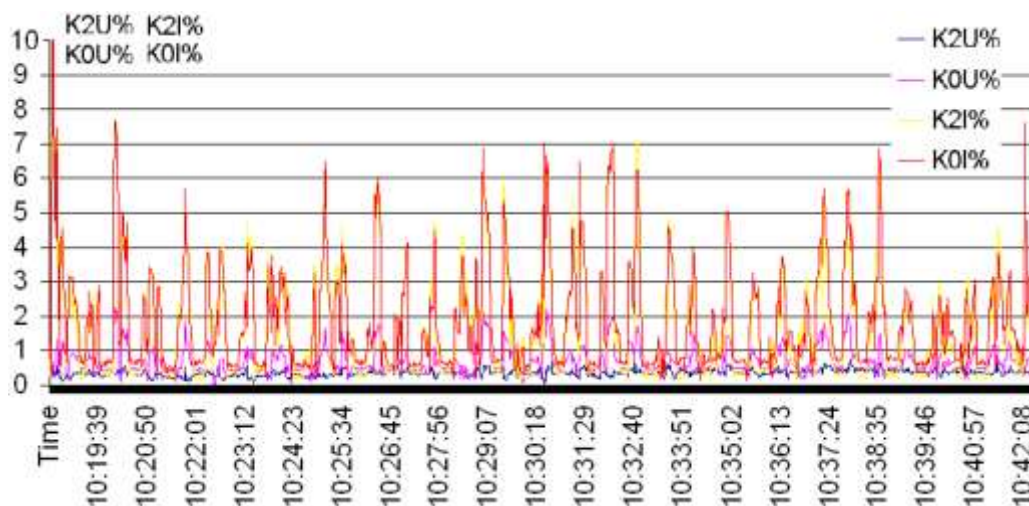


Рисунок 4 – Графік зміни коефіцієнтів несиметрії струмів та напруг сонячної електростанції

Важливим показником електромагнітної сумісності є сумарний коефіцієнт гармонійних спотворень (THD). Як і очікувалося, максимальні значення THD були виміряні під час роботи при низькій активній потужності, у той час як мінімальні значення спостерігалися, коли інвертори PV працювали практично при номінальній потужності. Значення суммарного коефіцієнта гармонійних спотворень струму THDi під час генерації становило близько 5 %, проте при відмиканнях інверторів збільшувалось до 14 %, що не відповідає нормованим ГОСТ 13109-97 значенням.

Коливні зміни реактивної потужності фотоелектричних систем можуть викликати швидке перемикання конденсаторів. У зв'язку з цим, піки напруги і коливання можуть відбуватися з непередбачуваною амплітудою і тривалістю. Це може призвести до виходу з ладу чутливе електронне обладнання або мінімізацію тривалості роботи. Таким чином, бажано зменшити існування коливних процесів. Сучасні конструкції інтелектуальних інверторів повинні мати функції контролю реактивної потужності та забезпечувати кращу компенсацію, що ґрунтується на системних параметрах і потребах в розподільній мережі.

Список використаної літератури

1. SUN, Jian. Power quality in renewable energy systems-Challenges and opportunities. In: International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'12), Spain. 2012. p. 28-30.
2. Гладь І. В. Аналіз показників якості електроенергії сонячної електростанції. [Текст] / Бацала Я. В., Гладь І. В., Николин У. М. // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2013. - № 4(49). – С 81-89 с.
3. Бацала Я. В. Удосконалення засобів контролю параметрів електроенергії відновлюваних джерел енергії [Текст] / Я. В. Бацала, І. В. Гладь, О.І. Кіянюк // Нафтогазова енергетика. – 2015. – №1 (23). – с.52-60.

I. Glad, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof.

Y. Batsala, TF

Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas

INFLUENCE OF SOLAR POWER PLANTS ON LOW-VOLTAGE DISTRIBUTION NETWORKS

It is analyzed indexes of electromagnetic compatibility of a solar power plant connected to a low-voltage network. According to the experimentally measured instantaneous values of currents and voltages generated by solar power stations, the currents of the higher harmonics are calculated. The measurement results showed that the presence of photovoltaic systems in the network can lead to a decrease in the quality parameters of the supply voltage, such as voltage fluctuations, harmonic distortion factors, voltage flicker and power factor. A comparison of the admissible values of the main parameters of electric energy with the experimental data is made. The probability of occurrence of oscillating energy-exchange processes and the need for experimental determination of the network impedance are shown.

Key words: solar power station, inverter, quality indicators, electromagnetic compatibility, reactive power, energy efficiency.

References

1. SUN, Jian. Power quality in renewable energy systems-Challenges and opportunities. // In: International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'12), – Spain. – 2012. p. 28-30.
2. Glad I. V., Batsala Y., Nykolyn U The analysis of power quality solar power. // *Rozvidka ta rozrobka naftovyh i gasovyh rodovysch*. – 2013. - № 4(49). – pp. 81-89 (Ukr)
3. Batsala Y., Glad I., Kiianiuk O. Improving means of control an electrical parametrs renewable energy. // *Naftogazova enerhetyka*. -2015. -№1 (23). – pp.52-60. (Ukr)

УДК 621.311:681.5

И.В. Гладь, канд. техн. наук, доц.

Я.В. Бацала, асс.

Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа

ВЛИЯНИЕ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ НА НИЗКОВОЛЬТНЫЕ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫЕ СЕТИ

Проанализированы показатели электромагнитной совместимости подключенной к низковольтной сети солнечной электростанции. Согласно измеренным экспериментально мгновенными значениями токов и напряжений, генерируемых с помощью солнечных электростанций, вычислено токи высших гармоник. Результаты измерения показали, что наличие фотоэлектрических систем в сети может привести к снижению параметров качества напряжения питания, таких как колебания напряжения, коэффициентов гармонических искажений, фликера напряжения и коэффициента мощности. Сделано сравнение допустимых значений основных параметров электрической энергии с экспериментальными данными. Показано вероятность возникновения колеблющихся энергообменных процессов и необходимость экспериментального определения импеданса сети.

Ключевые слова: солнечная электростанция, инвертор, показатели качества, электромагнитная совместимость, реактивная мощность, энергоэффективность.

Надійшла 13.04.2017

Received 13.04.2017

ПРИМЕНЕНИЕ АЛГОРИТМОВ БЫСТРОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ФУРЬЕ И ДИСКРЕТНОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ФУРЬЕ ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ, ЛОКАЛИЗАЦИИ И ОЦЕНКИ ИСКАЖЕНИЯ СИНУСОИДАЛЬНОСТИ КРИВЫХ ТОКА И НАПРЯЖЕНИЯ

Актуальность работы обусловлена необходимостью локализации и оценки искажения синусоидальности кривых тока и напряжения для выявления причинно-следственной связи появления искажений, правильной их оценки и определения источников гармонических искажений с целью эффективного проведения мероприятий по улучшению качества и надежности электроснабжения потребителей.

Ключевые слова: качество электроэнергии, гармоники, коэффициент гармоник, источник искажения, Быстрое Преобразование Фурье, Дискретное Преобразование Фурье.

Введение. Наличие нелинейных нагрузок и рост числа систем распределенной генерации электроэнергии приводят к искажению формы кривых напряжения и тока в системах электроснабжения (СЭС), то есть к появлению гармоник тока и напряжения.

Воздействие гармоник чревато нарушением работы энергетического оборудования и вредным воздействием на электроприемники потребителя.

Последствия воздействия гармоник также зависят от источника гармоник, его расположения в СЭС и характеристик сети [1]. Одни и те же гармоники от различных источников могут производить различный эффект в зависимости от их фазового угла по отношению к основной гармонике [2].

Для эффективного проведения мероприятий по повышению качества электроэнергии необходима правильная оценка характеристик искажения, которая во многом зависит от применяемого метода гармонического анализа.

Анализ литературных источников. Классическим методом анализа качества электроэнергии, используемым в системах мониторинга качества электроэнергии, является Преобразование Фурье (ПФ) [3], в частности – Быстрое Преобразование Фурье (БПФ) [4]. В основе ПФ лежит представление сигнала, как суммы синусоид разной частоты. То есть, амплитудно-временное представление преобразуется в частотный спектр.

Дискретное Преобразование Фурье (ДПФ) обеспечивает частотный анализ дискретных периодических сигналов. Фундаментальное уравнение для N -точечного ПФ сигнала $x(n)$ выглядит следующим образом [5]:

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) e^{-j\frac{2\pi}{N}kn},$$

где $k=0, 1, 2 \dots N-1$.

Для сигнала $x(n)$ при количестве выборок $N=2^L$ (L – целое число) применим алгоритм Быстрого Преобразования Фурье (БПФ), основная цель которого – ускоренное вычисления ДПФ путем сокращения требуемого числа операций умножения и сложения.

Преобразование Фурье дает частотную информацию о сигнале, то есть говорит нам о том, какое содержание каждой частоты в сигнале на исследуемом интервале измерения. Однако в какой момент времени возникла та или иная частота и когда она закончилась – на эти вопросы ответ получить не удастся [6]. Частичным выходом из этой ситуации является Оконное Преобразование Фурье (ОПФ) с движущейся по сигналу оконной функцией, имеющей компактный носитель. Для дискретного сигнала $x(n)$ уравнение ОПФ выглядит следующим образом [5]:

$$X(n, \lambda) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} x(n+m) \omega(m) e^{-j\lambda m},$$

где $\omega(m)$ – оконная функция.

Главной проблемой в использовании оконного преобразования Фурье для получения частотно-временной характеристики сигнала является так называемый принцип неопределенности Гейзенберга

[7], который возникает для параметров времени и частоты сигнала. В его основе лежит тот факт, что невозможно сказать точно какая частота присутствует в сигнале в данный момент времени (можно говорить только про диапазон частот) и невозможно сказать в какой точно момент времени частота присутствует в сигнале (можно говорить лишь про период времени). Также для Оконного Преобразования Фурье характерен эффект расширения спектра сигнала.

Для снижения влияния принципа неопределенности Гейзенберга было создано вейвлет-преобразование. Уравнение непрерывного вейвлет-преобразования функции $f(t)$ имеет вид [6, 8]:

$$\hat{\psi}(\tau, s) = \frac{1}{\sqrt{|s|}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \psi^* \left(\frac{t - \tau}{s} \right) dt,$$

где τ - сдвиг по времени, s - масштаб, а ψ^* - материнский вейвлет.

Вейвлет-преобразование выполняется аналогично ОПФ – сигнал перемножается с движущейся по сигналу вейвлет-функцией также как и с оконной функцией при ОПФ. Но есть два отличия между ОПФ и вейвлет-преобразованием [6]:

1. Не выполняется ПФ взвешенного с вейвлет-функцией сигнала.
2. Ширина окна изменяется. Так что преобразование вычисляется для каждой спектральной компоненты, что является наиболее важным свойством вейвлет-преобразования.

Понятие вейвлета означает волну, которая проходит через сигнал и является окном некоторой ширины (масштаба) для некоторого местоположения во времени, в процессе интегрирования сигнала. Материнский вейвлет - это функция, которая является прототипом для всех окон, которые будут генерироваться во время вейвлет-преобразования. Сдвиг по времени регулирует движение генерированных окон по временной компоненте сигнала [8].

Понятие масштаба является обратным к понятию ширины окна. Чем меньше ширина окна, тем больше масштаб, то есть окно захватывает меньшую часть сигнала и сигнал интегрируется более детально. Чем больше ширина окна, тем меньший масштаб, то есть окно захватывает большую часть сигнала и сигнал, соответственно, интегрируется менее детально. Таким образом, вейвлет-преобразование, в отличие от ОПФ, которое имеет постоянный масштаб в любой момент времени для всех частот, имеет лучшее представление времени и худшее представление частоты на низких частотах сигнала и лучшее представление частоты с худшим представлением времени на высоких частотах сигнала. Из этого следует, что вейвлет преобразование дает возможность уменьшить влияние принципа неопределенности Гейзенберга на полученном частотно-временном представлении сигнала. С его помощью низкие частоты имеют более детальное представление относительно времени, а высокие - относительно частоты [8].

В последние годы появилось много работ по применению вейвлет-анализа для оценки качества электроэнергии [9-12]. Однако его использование сопряжено с определенными трудностями:

1. Зависимость результатов от выбора материнского вейвлета.
2. ПФ большинства вейвлет-функций, как правило, дает больше одной гармоники в спектре.
3. Сложность перехода от вейвлет-коэффициентов к гармоникам.

По анализу литературных источников можно сделать вывод, что на сегодняшний день для анализа гармонического состава кривых тока и напряжения применяется алгоритм БПФ, который не позволяет оценить и локализовать искажение, вносимое резкопеременной нелинейной нагрузкой. Применение вейвлет-преобразования для решения задач оценки качества электроэнергии затруднительно и пока находится на стадии исследований. Следовательно, задача выбора оптимального алгоритма для оценки и локализации искажения кривых тока и напряжения по-прежнему актуальна.

Цели и задачи исследования. Целью данной работы являются исследования методов гармонического анализа с целью локализации искажения и оценки его величины.

Для реализации поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- провести анализ особенностей ДПФ и БПФ;
- провести математические выкладки, обосновывающие возможность совместного использования БПФ и ДПФ;
- по результатам исследований сделать выводы.

Материал и результаты исследований. Особенностью БПФ является то, что с помощью этого преобразования вычисляются сразу все компоненты выходного спектра сигнала. В результате исходный сигнал $x(t)$ представляется, как сумма синусоид (гармоник) разной частоты:

$$x(t) = A_1 \sin(\omega t + \alpha_1) + A_2 \sin(2\omega t + \alpha_2) + \dots + A_n \sin(n\omega t + \alpha_n), \quad (1)$$

где A_1, A_2, \dots, A_n – амплитуды гармонических составляющих сигнала $x(t)$; ω – угловая частота; $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$ – фаза гармонических составляющих сигнала; n – максимальный порядок гармоник.

Можно утверждать, что БПФ является индикатором наличия в сигнале на интервале измерения определенных гармонических составляющих.

Отличительной особенностью ДПФ по отношению к БПФ является возможность анализировать исходный сигнал по каждой гармонике отдельно [13].

Согласно [14], для систем электроснабжения частотой 50 Гц в качестве основного интервала времени при измерении показателей качества электроэнергии принимается интервал длительностью 10 периодов гармоники основной частоты.

С целью детализации частотного наполнения сигнала на интервале измерения проведем расчет точек спектра, полученных в результате БПФ, используя Дискретное Преобразование Фурье (ДПФ) (рис.1).

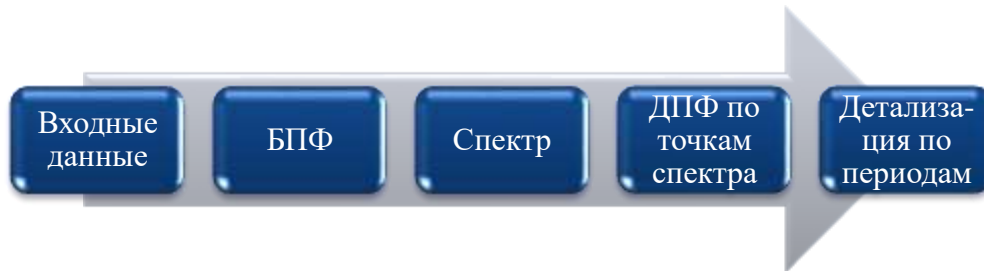


Рисунок 1 – Усовершенствование метода гармонического анализа

Для этого необходимо умножить каждый период исходного сигнала (1) на основном интервале измерения на синусоиды и косинусоиды единичной амплитуды с частотами, полученными в результате БПФ сигнала, и проинтегрировать на интервале 2π .

Произведение синусоиды с амплитудой A_1 , частотой n_1 и фазой α_1 на синусоиду единичной амплитуды с частотой n_2 и фазой α_2 [15]:

$$\begin{aligned} A_1 \sin(n_1 t + \alpha_1) \sin(n_2 t + \alpha_2) &= \frac{A_1}{2} (\cos(n_1 t + \alpha_1 - n_2 t - \alpha_2) - \cos(n_1 t + \alpha_1 + n_2 t + \alpha_2)) = \\ &= \frac{A_1}{2} \cos((n_1 - n_2)t + (\alpha_1 - \alpha_2)) - \frac{A_1}{2} \cos((n_1 + n_2)t + (\alpha_1 + \alpha_2)) = \\ &= \frac{A_1}{2} (\cos(n_1 - n_2)t \cos(\alpha_1 - \alpha_2) - \sin(n_1 - n_2)t \sin(\alpha_1 - \alpha_2)) - \\ &- \frac{A_1}{2} (\cos(n_1 + n_2)t \cos(\alpha_1 + \alpha_2) - \sin(n_1 + n_2)t \sin(\alpha_1 + \alpha_2)) = \\ &= \frac{A_1}{2} \cos(\alpha_1 - \alpha_2) \cos(n_1 - n_2)t - \frac{A_1}{2} \sin(\alpha_1 - \alpha_2) \sin(n_1 - n_2)t - \\ &- \frac{A_1}{2} \cos(\alpha_1 + \alpha_2) \cos(n_1 + n_2)t + \frac{A_1}{2} \sin(\alpha_1 + \alpha_2) \sin(n_1 + n_2)t \end{aligned}$$

Неопределенный интеграл произведения синусоиды с амплитудой A_1 , частотой n_1 и фазой α_1 на синусоиду единичной амплитуды с частотой n_2 и фазой α_2 [16]:

$$\begin{aligned} \int A_1 \sin(n_1 t + \alpha_1) \sin(n_2 t + \alpha_2) dt &= \frac{A_1}{2} \cos(\alpha_1 - \alpha_2) \int \cos(n_1 - n_2) t dt - \\ &- \frac{A_1}{2} \sin(\alpha_1 - \alpha_2) \int \sin(n_1 - n_2) t dt - \frac{A_1}{2} \cos(\alpha_1 + \alpha_2) \int \cos(n_1 + n_2) t dt + \\ &+ \frac{A_1}{2} \sin(\alpha_1 + \alpha_2) \int \sin(n_1 + n_2) t dt = \frac{A_1}{2} \cos(\alpha_1 - \alpha_2) \frac{1}{n_1 - n_2} \sin(n_1 - n_2) t - \\ &- \frac{A_1}{2} \sin(\alpha_1 - \alpha_2) \left(-\frac{1}{n_1 - n_2} \right) \cos(n_1 - n_2) t - \frac{A_1}{2} \cos(\alpha_1 + \alpha_2) \frac{1}{n_1 + n_2} \sin(n_1 + n_2) t + \\ &+ \frac{A_1}{2} \sin(\alpha_1 + \alpha_2) \left(-\frac{1}{n_1 + n_2} \right) \cos(n_1 + n_2) t = \frac{A_1 \cos(\alpha_1 - \alpha_2) \sin(n_1 - n_2) t}{2(n_1 - n_2)} + \\ &+ \frac{A_1 \sin(\alpha_1 - \alpha_2) \cos(n_1 - n_2) t}{2(n_1 - n_2)} - \frac{A_1 \cos(\alpha_1 + \alpha_2) \sin(n_1 + n_2) t}{2(n_1 + n_2)} + \frac{A_1 \sin(\alpha_1 + \alpha_2) \cos(n_1 + n_2) t}{2(n_1 + n_2)} \end{aligned}$$

Вычисление интегральной суммы произведения синусоиды с амплитудой A_1 , частотой n_1 и фазой α_1 на синусоиду единичной амплитуды с частотой n_2 и фазой α_2 на интервале 2π производится по формуле Ньютона-Лейбница [17]:

$$\begin{aligned} \int_0^{2\pi} A_1 \sin(n_1 t + \alpha_1) \sin(n_2 t + \alpha_2) &= \left(\frac{A_1 \cos(\alpha_1 - \alpha_2) \sin(n_1 - n_2) t}{2(n_1 - n_2)} + \right. \\ &+ \frac{A_1 \sin(\alpha_1 - \alpha_2) \cos(n_1 - n_2) t}{2(n_1 - n_2)} - \frac{A_1 \cos(\alpha_1 + \alpha_2) \sin(n_1 + n_2) t}{2(n_1 + n_2)} + \\ &+ \left. \frac{A_1 \sin(\alpha_1 + \alpha_2) \cos(n_1 + n_2) t}{2(n_1 + n_2)} \right) \Bigg|_0^{2\pi} = \frac{A_1 \cos(\alpha_1 - \alpha_2) \sin(n_1 - n_2) 2\pi}{2(n_1 - n_2)} + \\ &+ \frac{A_1 \sin(\alpha_1 - \alpha_2) \cos(n_1 - n_2) 2\pi}{2(n_1 - n_2)} - \frac{A_1 \cos(\alpha_1 + \alpha_2) \sin(n_1 + n_2) 2\pi}{2(n_1 + n_2)} + \\ &+ \frac{A_1 \sin(\alpha_1 + \alpha_2) \cos(n_1 + n_2) 2\pi}{2(n_1 + n_2)} - \frac{A_1 \cos(\alpha_1 - \alpha_2) \sin(n_1 - n_2) 0}{2(n_1 - n_2)} - \\ &- \frac{A_1 \sin(\alpha_1 - \alpha_2) \cos(n_1 - n_2) 0}{2(n_1 - n_2)} + \frac{A_1 \cos(\alpha_1 + \alpha_2) \sin(n_1 + n_2) 0}{2(n_1 + n_2)} - \\ &- \frac{A_1 \sin(\alpha_1 + \alpha_2) \cos(n_1 + n_2) 0}{2(n_1 + n_2)} = \frac{A_1 \sin(\alpha_1 - \alpha_2)}{2(n_1 - n_2)} + \frac{A_1 \sin(\alpha_1 + \alpha_2)}{2(n_1 + n_2)} - \\ &- \frac{A_1 \sin(\alpha_1 - \alpha_2)}{2(n_1 - n_2)} - \frac{A_1 \sin(\alpha_1 + \alpha_2)}{2(n_1 + n_2)} = 0 \end{aligned}$$

Интегральная сумма произведения двух синусоид разной частоты на интервале, кратном 2π , равна нулю.

Произведение синусоиды с амплитудой A_1 , частотой n и фазой α_1 на синусоиду единичной амплитуды с частотой n и фазой α_2 (одинаковая частота) [15]:

$$\begin{aligned} A_1 \sin(nt + \alpha_1) \sin(nt + \alpha_2) &= \frac{A_1}{2} (\cos(nt + \alpha_1 - nt - \alpha_2) - \cos(nt + \alpha_1 + nt + \alpha_2)) = \\ &= \frac{A_1}{2} (\cos(\alpha_1 - \alpha_2) - \cos(2nt + (\alpha_1 + \alpha_2))) = \frac{A_1 \cos(\alpha_1 - \alpha_2)}{2} - \\ &- \frac{A_1}{2} (\cos 2nt \sin(\alpha_1 + \alpha_2) - \sin 2nt \cos(\alpha_1 + \alpha_2)) = \frac{A_1 \cos(\alpha_1 - \alpha_2)}{2} - \\ &- \frac{A_1 \cos 2nt \sin(\alpha_1 + \alpha_2)}{2} + \frac{A_1 \sin 2nt \cos(\alpha_1 + \alpha_2)}{2} \end{aligned}$$

Неопределенный интеграл произведения синусоиды с амплитудой A_1 , частотой n и фазой α_1 на синусоиду единичной амплитуды с частотой n и фазой α_2 (одинаковая частота) [16]:

$$\int A_1 \sin(nt + \alpha_1) \sin(nt + \alpha_2) dt = \frac{A_1 \cos(\alpha_1 - \alpha_2)}{2} \int dt - \frac{A_1 \sin(\alpha_1 + \alpha_2)}{2} \int \cos 2nt dt +$$

$$+ \frac{A_1 \cos(\alpha_1 + \alpha_2)}{2} \int \sin 2nt dt = \frac{A_1 \cos(\alpha_1 - \alpha_2)}{2} t - \frac{A_1 \sin(\alpha_1 + \alpha_2)}{2} \left(\frac{1}{2n} \sin 2nt \right) +$$

$$+ \frac{A_1 \cos(\alpha_1 + \alpha_2)}{2} \left(-\frac{1}{2n} \cos 2nt \right) = \frac{A_1 \cos(\alpha_1 - \alpha_2)}{2} t - \frac{A_1 \sin(\alpha_1 + \alpha_2) \sin 2nt}{4n} -$$

$$- \frac{A_1 \cos(\alpha_1 + \alpha_2) \cos 2nt}{4n}$$

Интегральная сумма произведения синусоиды с амплитудой A_1 , частотой n и фазой α_1 на синусоиду единичной амплитуды с частотой n и фазой α_2 на интервале 2π (одинаковая частота) по формуле Ньютона-Лейбница [17]:

$$\int_0^{2\pi} A_1 \sin(nt + \alpha_1) \sin(nt + \alpha_2) = \left(\frac{A_1 \cos(\alpha_1 - \alpha_2)}{2} t - \frac{A_1 \sin(\alpha_1 + \alpha_2) \sin 2nt}{4n} - \right.$$

$$\left. - \frac{A_1 \cos(\alpha_1 + \alpha_2) \cos 2nt}{4n} \right) \Big|_0^{2\pi} = \frac{A_1 \cos(\alpha_1 - \alpha_2)}{2} 2\pi - A_1 \sin(\alpha_1 + \alpha_2) \frac{\sin 2n2\pi}{4n} -$$

$$- A_1 \cos(\alpha_1 + \alpha_2) \frac{\cos 2n2\pi}{4n} - \frac{A_1 \cos(\alpha_1 - \alpha_2)}{2} 0 + A_1 \sin(\alpha_1 + \alpha_2) \frac{\sin 2n0}{4n} +$$

$$+ A_1 \cos(\alpha_1 + \alpha_2) \frac{\cos 2n0}{4n} = A_1 \pi \cos(\alpha_1 - \alpha_2)$$

Для случаев $\alpha_2=0$ и $\alpha_2=\pi/2$ получаем систему уравнений:

$$\begin{cases} A_1 \pi \cos(\alpha_1 - 0) = a \\ A_1 \pi \cos(\alpha_1 - \frac{\pi}{2}) = b \end{cases}$$

или

$$\begin{cases} A_1 \pi \cos \alpha_1 = a \\ A_1 \pi \sin \alpha_1 = b \end{cases}$$

где a – значение интегральной суммы произведения синусоиды с амплитудой A_1 , частотой n и фазой α_1 на синусоиду единичной амплитуды с частотой n и фазой $\alpha_2=0$ на интервале 2π ; b – значение интегральной суммы произведения синусоиды с амплитудой A_1 , частотой n и фазой α_1 на синусоиду единичной амплитуды с частотой n и фазой $\alpha_2=\pi/2$ на интервале 2π .

В результате для каждой гармонической составляющей на l -м периоде основного интервала измерения получаем систему уравнений:

$$\begin{cases} A_{kl} \pi \cos \alpha_{kl} = a_{kl} \\ A_{kl} \pi \sin \alpha_{kl} = b_{kl} \end{cases}, \quad (2)$$

где A_{kl} – амплитуда k -й гармоники сигнала на l -м периоде основного интервала измерения; k – порядок гармоники; $l=1 \div 10$ – порядковый номер периода на основном интервале измерения; α_{kl} – фаза k -й гармоники на l -м периоде основного интервала измерения; a_{kl} – интегральная сумма на интервале 2π произведения сигнала на функцию синуса единичной амплитуды k -й гармоники на l -м периоде основного интервала измерения; b_{kl} – интегральная сумма на интервале 2π произведения сигнала на функцию косинуса единичной амплитуды k -й гармоники на l -м периоде основного интервала измерения.

Система уравнений (2.8) не что иное, как тригонометрическое представление комплексного числа $z_{kl} = a_{kl} + jb_{kl}$ [116]. Тогда амплитуда k -й гармонической составляющей на l -м периоде основного интервала измерения определяется, как:

$$A_{kl} = \frac{|z_{kl}|}{\pi},$$

где $|z_{kl}|$ – модуль комплексного числа z_{kl} .

Фаза k -й гармоники на l -м периоде основного интервала измерения:

$$\alpha_{kl} = \arg z_{kl},$$

где $\arg z_{kl}$ – аргумент комплексного числа z_{kl} .

Таким образом с помощью дополнительного ДПФ по периодам гармоники основной частоты (ДПФ по периодам) удастся локализовать время появления и исчезновения высших гармоник с точностью до одного периода гармоники основной частоты (рис.2).

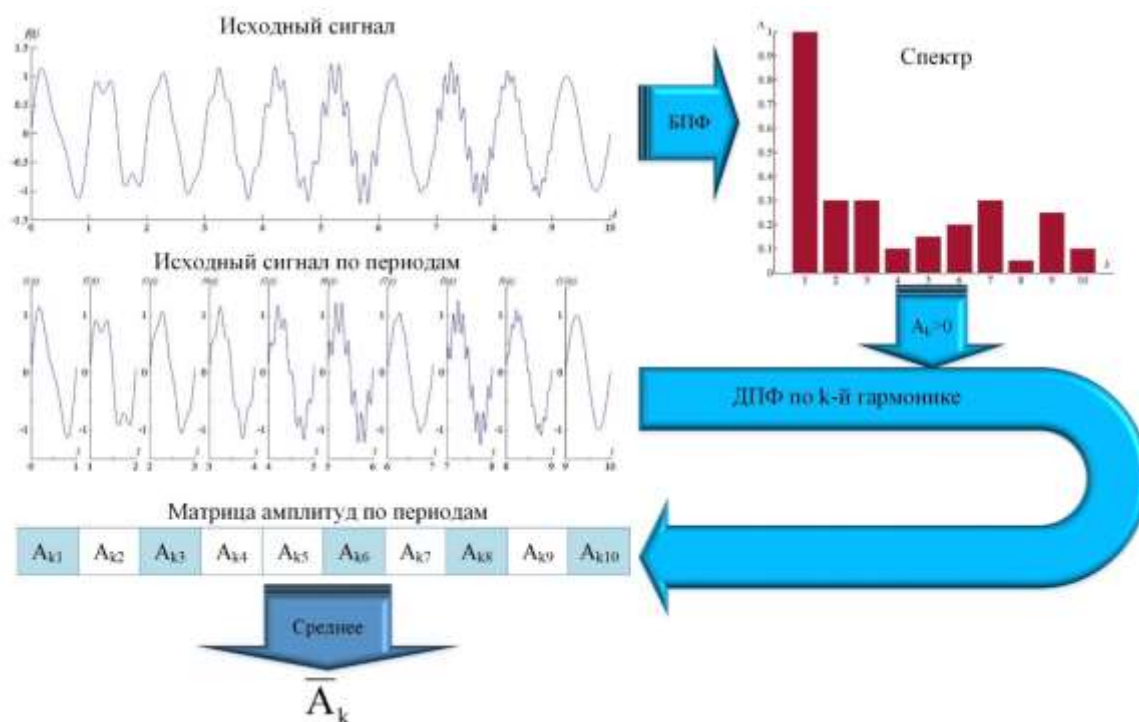


Рисунок 2 – Модификация метода гармонического анализа

Выводы:

- в электроэнергетике наиболее распространенным методом гармонического анализа искажения кривых тока и напряжения является Быстрое Преобразование Фурье;
 - ни один из существующих методов гармонического анализа не позволяет с достаточной точностью определить гармонику и одновременно локализовать время ее появления и исчезновения;
 - для снижения влияния принципа неопределенности Гейзенберга целесообразно комбинировать методы гармонического анализа;
- применение ДПФ по периодам позволяет локализовать время появления/исчезновения гармонической составляющей с точностью до периода гармоники основной частоты

Список использованной литературы

1. Power Quality Harmonics Analysis and Real Measurements Data /edited by Prof. Gregorio Romero. – InTech, 2011. – 258 p.
2. Харлов, Н. Н. Электромагнитная совместимость в электроэнергетике: Учебное пособие / Н. Н. Харлов – Томск: Изд-во ТПУ, 2007. – 207 с.
3. Бессонов, Л. А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи / Л. А. Бессонов. – 9-е изд., перераб. и доп. – М: Высшая школа, 1996. – 638 с.
4. Лайонс, Р. Цифровая обработка сигналов: Второе издание: пер. с англ. – М: ООО «Бином-Пресс», 2006. – 656 с.
5. Power Quality Harmonics Analysis and Real Measurements Data / [edited by Prof. Gregorio Romero]. – InTech, 2011. – 258 p.
6. Введение в вейвлет-преобразование [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.autex.spb.su/download/wavelet/books/tutorial.pdf> - 05.09.2016 г. – Загл. с экрана.
7. Принцип неопределенности [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki/Принцип_неопределённости - 25.07.2017 г. – Загл. с экрана.
8. Непрерывное wavelet преобразование [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://habrahabr.ru/post/103899/> - 18.07.2017 г. – Загл. с экрана.
9. Wavelet based feature extraction for classification of Power Quality Disturbances [Электронный

ресурс] / Sudipta Nath, Priyanjali Mishra // International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'11). – Las Palmas de Gran Canaria (Spain), 13-15th April, 2011. – Режим доступа: <http://www.icrepq.com/icrepq'11/340-nath.pdf> – 19.07.2017 г. – Загл. с экрана.

10. Wei, L. Detection and Localization of Power Quality Disturbances Based on Wavelet Network / L. Wei, H. Pu, Z. L. Wu // Proceedings of the 6th WSEAS International Conference on Signal Processing, Robotics and Automation. – Corfu Island, Greece. – 2007. – pp. 13-18.

11. Vega, V. Automatic power quality disturbance classification using wavelet, Support Vector Machine and Artificial Neural Network / V. Vega, V N. Kagan, G. Ordonez, C. Duarte // CIRED 2009 – 20th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution. – Prague, Czech Republic. – 2009. – Part 1. – pp. 1-4.

12. Singh, K. Classification of Power Quality Disturbances using Wavelet Transform and Neural Network / K. Singh, A. Tewari // International Journal of Engineering Research & Technology. – 2015. – V. 4. – № 5. – pp. 1423 – 1427.

13. Быстрое преобразование Фурье [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://ip-5-125.unn.ru/ftp/public/analog/5.pdf> - 20.07.2017 г. – Загл. с экрана.

14. EN 61000-4-30:2009. Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-30: Testing and measurement techniques - Power quality measurement methods (IEC 61000-4-30:2008). – Approved 30 April 2009. – BSI. – 66 p.

15. Тригонометрические тождества [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki/Тригонометрические_тождества – 24.12.2016 г. – Загл. с экрана.

16. Список интегралов тригонометрических функций [Электронный ресурс]. - режим доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki/Список_интегралов_от_тригонометрических_функций – 24.12.2016 г. – Загл. с экрана.

17. Пособие по математике для поступающих в вузы: учеб. пособ. / А. Д. Кутасов, Т. С. Пиголкина, В. И. Чехлов, Т. Х. Яковлева; под. ред. Г. Н. Яковлева. – 2-е изд. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1985. – 480 с.

A. Voloshko, Dr. Sc. Sciences., Prof.

D. Filyanin

National Technical University of Ukraine «Kiev Polytechnical Institute»

DETECTION AND LOCALIZATION OF POWER QUALITY DISTURBANCES BASED ON FAST FOURIER TRANSFORM AND DISCRETE FOURIER TRANSFORM

The urgency of the work is due to the need to localize and evaluate power quality distortion for understanding the cause-effect relation of the appearance of distortions, their correct evaluation and identify sources of harmonic in order to improve power quality.

Key words: power quality, harmonics, total harmonic distortion, distortion source, Fast Fourier Transform, Discrete Fourier Transform.

References

1. Power Quality Harmonics Analysis and Real Measurements Data / edited by Prof. Gregorio Romero. – InTech, 2011. – P. 258 – ISBN 978-953-307-335-4

2. Kharlov N.N. Elektromagnitnaya sovместimost v elektroenergetike [Electromagnetic compatibility in power industry]. – Tomsk, TPU Publ. House. – 2007. – 207 p.

3. Bessonov L. A. Teoreticheskie osnovi elektrotehniki [Theoretical fundamentals of electrical engineering]. M: Hihg school, 1996. 638 p.

4. Richard G. Lyons. Understanding Digital Signal Processing: 3rd ed. – Pearson Education, Inc. – 2011. – 564 p.

5. Power Quality Harmonics Analysis and Real Measurements Data / [edited by Prof. Gregorio Romero]. – InTech, 2011. – 258 p.

6. Vvedenie v veyvlet preobrazovanie [Introduction in wavelet-transform]. Available at: <http://www.autex.spb.su/download/wavelet/books/tutorial.pdf> (accessed – 05 september 2016).

7. Uncertainty principle. Available at: https://en.wikipedia.org/wiki/Uncertainty_principle (accessed - 25 July 2017).

8. Nепреривное wavelet preobrazovanie [Continuous wavelet transform]. Available at: <https://habrahabr.ru/post/103899/> (accessed - 18 July 2017).

9. Wavelet based feature extraction for classification of Power Quality Disturbances [Электронный ресурс] / Sudipta Nath, Priyanjali Mishra // International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'11). – Las Palmas de Gran Canaria (Spain), 13-15th April, 2011. – Режим доступа: <http://www.icrepq.com/icrepq'11/340-nath.pdf> – 19.07.2017 г. – Загл. с экрана.
10. Wei, L. Detection and Localization of Power Quality Disturbances Based on Wavelet Network / L. Wei, H. Pu, Z. L. Wu // Proceedings of the 6th WSEAS International Conference on Signal Processing, Robotics and Automation. – Corfu Island, Greece. – 2007. – pp. 13– 18.
11. Vega, V. Automatic power quality disturbance classification using wavelet, Support Vector Machine and Artificial Neural Network / V. Vega, V N. Kagan, G. Ordonez, C. Duarte // **CIREC 2009 - 20th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution. - Prague, Czech Republic.** – 2009. – Part 1. – pp. 1– 4.
12. Singh, K. Classification of Power Quality Disturbances using Wavelet Transform and Neural Network / K. Singh, A. Tewari // International Journal of Engineering Research & Technology. – 2015. – V. 4. - № 5. – pp. 1423– 1427.
13. Bistroe preobrazovanie Fur'e [Fast Fourier transform]. Available at: <http://ip-5-125.unn.ru/ftp/public/analog/5.pdf> (accessed – 20 July 2017).
14. EN 61000-4-30:2009. Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-30: Testing and measurement techniques – Power quality measurement methods (IEC 61000-4-30:2008). – Approved 30 April 2009. – BSI. – 66 p.
15. List of trigonometric identity. Available at: https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_trigonometric_identities (accessed - 24 december 2016).
16. List of integrals of trigonometric functions. Available at: https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_integrals_of_trigonometric_functions (accessed - 24 december 2016).
17. Kutasov, A. D. Posobie po matematike dlya postupauschih v vuzi [A manual on mathematics for students entering universities]. M: Science, 1985. 480 p.

УДК 621.311

А. В. Волошко, д-р техн. наук, проф.
Д. В. Філянін

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

**ВИКОРИСТАННЯ АЛГОРИТМІВ ШВИДКОГО ПЕРЕТВОРЮВАННЯ ФУР'Є ТА
ДИСКРЕТНОГО ПЕРЕТВОРЮВАННЯ ФУР'Є ДЛЯ ВИЯВЛЕННЯ, ЛОКАЛІЗАЦІЇ І ОЦІНКИ
СПОТВОРЕННЯ СИНУСОЇДАЛЬНОСТІ КРИВИХ ТОКА І НАПРУГИ**

Актуальність роботи обумовлена необхідністю локалізації та оцінки спотворення синусоїдальності кривих струму і напруги для виявлення причинно-наслідкового зв'язку появи спотворень, правильної їх оцінки та визначення джерел гармонічних спотворень з метою ефективного проведення заходів щодо поліпшення якості та надійності електропостачання споживачів.

Ключові слова: якість електроенергії, гармоніки, коефіцієнт гармонік, джерело спотворення, Швидке Перетворення Фур'є, Дискретне Перетворення Фур'є.

Надійшла 27.09.2017
Received 27.09.2017

СИСТЕМНІ ЕКОЛОГО-ЕНЕРГЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ENVIRONMENTAL AND ENERGY SYSTEM RESEARCH

УДК 504.064.3

О.А. Дорож, канд. техн. наук

В.І. Ковальчук, канд. техн. наук

Одеський національний політехнічний університет

СИСТЕМИ РАДІАЦІЙНОГО МОНІТОРИНГУ АЕС

Виконано аналіз функціонування систем радіаційного моніторингу на атомних електростанціях України. Проаналізовано дані про аналогічні системи, що діють в інших країнах. Оцінено взаємозв'язок енергонапруженості територій і контрольованих площ.

Ключові слова: радіаційний моніторинг, система контролю, атомна електростанція.

Вступ. Різного рівня аварії на АЕС з вибитком радіації (АЕС «Три-Майл-Айленд» у США, «Челябінськ-40» в 1957 р., Ленінградська АЕС в 1970 р.) і техногенні катастрофи Чорнобиля та Фукусіми сприяли формуванню негативної громадської думки щодо ядерної енергетики. Однак вона залишається суттєвою складовою енергетичного виробництва. При загальній світовій генерації 20269 ТВт·год частка АЕС перевищує 13 % [1].

У 2016 р. в 31-й країні світу експлуатувалися 449 енергоблоків 191 атомної електростанції з загальною електричною потужністю близько 392 088 МВт [2]. 60 енергоблоків знаходяться в стадії будівництва. Більше 160 енергоблоків закриті [3].

Територіальне розміщення станцій неоднорідне. Найбільш щільно заселені Східне узбережжя США ($3,7 \cdot 10^{-5}$ 1/км²), Західна Європа ($2,7 \cdot 10^{-5}$ 1/км²) і Японія ($14,8 \cdot 10^{-5}$ 1/км²).

На думку експертів [4]:

- за нормальних умов експлуатації ядерна енергетика і поновлювані системи мають тенденцію займати нижню область спектра ризику для здоров'я, а енергетичні системи, що використовують вугілля і вуглеводні, знаходяться у верхній області цього спектра;

- ризики для здоров'я від важких аварій на АЕС і ТЕС на нафті і газі мають один порядок величини і на два порядки менше, ніж ризик від гідравлічного способу отримання енергії (наприклад, Саяно-Шушенська ГЕС).

Можливість виходу радіоактивних речовин за межі контрольованих зон підприємств паливного циклу безумовно створює загрозу на великих територіях для довкілля, обумовлює необхідність робити комплекс заходів щодо забезпечення безпеки населення. Складування відходів може призвести до їх витоку з місць поховання зараз або в майбутньому. Тому актуальним завданням є організація і функціонування систем моніторингу радіаційної обстановки в районах розміщення АЕС, а також на інших територіях з урахуванням перспектив розширення географії ядерних генерацій.

Метою роботи є оцінка зв'язку енергонапруженості територій розміщення АЕС і контрольованих площ, а також аналіз забезпеченості територій розміщення АЕС радіаційним моніторингом.

Об'єкт і вихідні матеріали досліджень. Об'єктами дослідження є системи радіаційного моніторингу, що функціонують на американському і європейському континентах, в країнах СНД в межах контрольованих територій розміщення АЕС, а також країн, що розвивають ядерну енергетику. Були використані офіційні матеріали, розміщені на сайтах електростанцій, а також опубліковані матеріали про аналогічні системах моніторингу в країнах колишнього СРСР і ін.

Метод дослідження.

Радіаційно-екологічна складова моніторингу має три основних напрямки:

- оцінка і контроль радіаційного стану приземного шару атмосфери, компонентів наземних і водних екосистем, продуктів харчування та ін.;

- вивчення впливу на навколишнє середовище техногенних об'єктів, місць зберігання та захоронення радіоактивних відходів і ін.;

- спостереження за міграцією радіонуклідів в компонентах навколишнього середовища з метою прогнозування зміни радіаційної обстановки.

© О.А. Дорож, В.І. Ковальчук, 2017

Системи регулярних тривалих спостережень, виявлення та оповіщення створюються на внутрішньодержавному рівні і в рамках міжнародного співробітництва.

У Великобританії функціонують дві національні системи моніторингу і ряд автономних. Засоби оповіщення та моніторингу UKWMOB призначені для ситуацій радіоактивного ураження. Інформація про ядерні вибухи надходить на пункти управління від 872 постів моніторингу (територія Великобританії розділена на 5 секторів, в кожному 5 груп по 35 постів моніторингу). У кожній групі пункт управління збирає інформацію від постів моніторингу і оповіщає про загрозу випадання радіоактивних опадів.

Загальнодержавна мережа моніторингу витоку радіоактивних речовин, створена в рамках національної програми 1987 р, базується на 80-90 метеорологічних станціях країни RIMNET.

Навколо підприємства з переробки і зберігання відпрацьованого ядерного палива в Селлафілде встановлена автоматизована система радіаційного моніторингу з 37 постів компанії BRITISH NUCLEAR FNOEL.

У Німеччині функціонує інформаційна система федерального уряду «Радіоактивність навколишнього середовища». Вона забезпечує:

- безперервне спостереження за радіоактивністю в навколишньому середовищі;
- завчасне виявлення та оцінку можливих подій при невисоких рівнях впливу радіоактивних речовин;
- постійне прогнозування обстановки при аналогічних випадках з урахуванням впливу радіоактивних речовин на населення;
- отримання даних про наслідки впливу на населення високих рівнів радіоактивності навколишнього середовища.

Інтегрована система контролю радіоактивності на території країни тріступенева:

- 1) вимірювальні пости визначення радіоактивності в навколишньому середовищі;
- 2) збір, обробка та документування даних від постів адміністративними установами країни;
- 3) систематизація та оцінка спостережень радіоактивності центральною станцією країни.

Число вимірювальних постів, віддалених приблизно на 13 км один від одного, близько 2000.

У США навколо кожної АЕС є 16 дозиметричних приладів «Сентр RCE-1012» на відстані приблизно 4 км від майданчика АЕС по одному в кожному секторі кола, розраховані на реєстрацію γ -випромінювання. Створюється автоматична система контролю газів, що виділяються АЕС. Інформація концентрується в командному пункті управління ядерної безпеки штату.

У Франції розроблена бортова система аерозйомки рівнів радіації на поверхні Землі. Вона служить для виявлення точкових джерел іонізуючого випромінювання або радіоактивного забруднення великих площ.

Для оцінки і зіставлення систем моніторингу доцільно використання відносних показників енергонапружності територій (F) і питомих контрольованих площ (E).

Під енергонапружності територій F розуміється відношення потужності енергооб'єктів до площі обслуговується їм території:

$$F = \frac{\sum N_i}{S},$$

де $\sum N_i$ - сумарна потужність енергооб'єкту; S - площа території, що обслуговується.

Питома контрольована площа E є відношення площі території, що обслуговується енергооб'єктом, до кількості постів контролю радіаційної обстановки

$$E = \frac{S}{n}.$$

Узагальнені дані по системам моніторингу радіаційної обстановки в різних країнах наведені в табл. 1.

Таблиця 1 - Узагальнені дані по системам моніторингу радіаційної обстановки і енергозабезпечення

Країна	Встановлена потужність ядерних блоків, МВт	Територія, тис. км ²	Населення, млн. чол.	Кількість постів	Енергонапруженість, МВт/тис.км ²	Розмір контрольованих площ, тис.км ² /пост	Енергоозброєність, МВт/млн.чол.
Болгарія	2722	110,9	7,32	26	24,5	4,27	371,7
Великобританія	12020	130,3	49,99	996	92,2	0,13	240,4
Німеччина	20643	357,0	82,60	2000	57,8	0,18	249,9
Фінляндія	2656	337,0	5,10	35	7,88	9,63	520,8
США	99096	9400,0	250,00	1664	10,5	5,65	396,4

Аналіз колонок 6 і 7 дозволяють відзначити наявність кореляції їх даних.

На рис. 1 наведені узагальнені дані, що зв'язують ці показники, для деяких європейських держав. Залежність включає як дані для територій держав в цілому (Німеччина, Великобританія), так і для спостережуваних площ, прилеглих до АЕС (Росія та ін.).

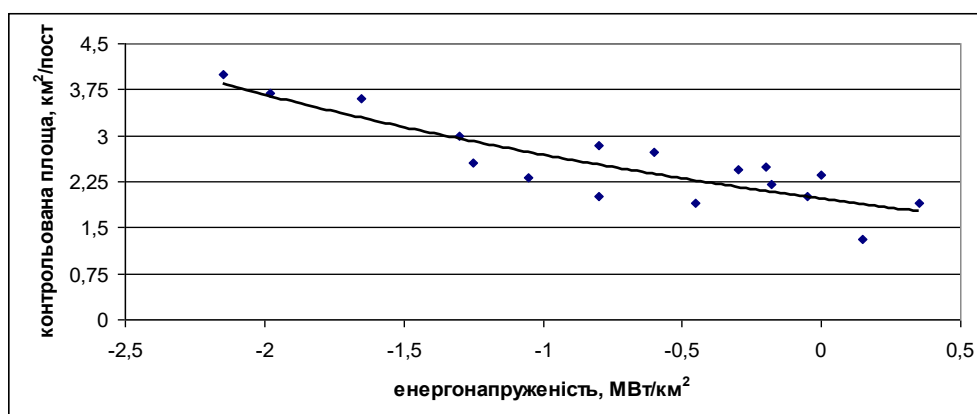


Рисунок 1 – Вплив енергонапруженості на розмір контрольованої території

Спільний аналіз даних, дозволяє відзначити стійку їх кореляцію. У логарифмічних координатах цей зв'язок досить коректно апроксимується експонентою з коефіцієнтом кореляції близько 0,7.

Залежність має обернено пропорційний характер і практично охоплює весь інтервал використаних статистичних даних співвідношенням виду

$$F = 1,9846 \cdot E^{-0,3254}$$

де F - енергонапруженості території, МВт/км²; E - контрольована площа, км²/пост.

Результати досліджень і їх аналіз.

Наведені відносні показники дозволяють відзначити, що за досить високої енергонапруженості територій Великобританії і Німеччини (50 - 90 МВт/тис.км²) має місце порівняно низька енергоозброєність населення (240 МВт/млн.чол.). При цьому на кожен пост контролю радіаційної обстановки припадає менше 200 км².

У США за близьких значеннях енергонапруженості спостерігається велика енергоозброєність населення і більш ніж в два рази більша територія, контрольована одним постом радіаційного стану.

У радянських проєктах АЕС (Болгарія, Фінляндія) контрольована одним постом територія близька до американських проєктів, ідеологія яких передбачає моніторинг тільки прилеглих територій, на відміну від системного підходу європейських проєктів.

Аналіз аналогічних даних по АЕС України (табл. 2) показує, що енергонапруженості зони спостереження пропорційна встановленої потужності і не перевищує 2 МВт/км². Мінімальна вона на Хмельницькій станції, де є всього два енергоблоки. При розрахунку параметрів Чорнобильської станції з урахуванням збільшення зони спостереження до 60 км енергонапруженість не перевищує 0,4 МВт/км².

На АЕС України спостереження за рівнем радіоактивного забруднення ведуться за допомогою автоматизованої системи контролю радіаційної обстановки (АСКРО) - зазвичай на проммайданчику АЕС і в 30-ти кілометровій зоні [5 - 8].

АСКРО включає:

- пости контролю потужності γ -доз на території АЕС, в санітарно-захисній зоні та в 30-ти кілометровій зоні;
- автоматизовані метеостанції (температура і відносна вологість повітря, швидкість і напрям вітру, атмосферний тиск, кількість опадів, температура ґрунту і поверхні води);
- метеолокатори висотного контролю;
- пересувні лабораторії радіометричного і γ -спектрометричного аналізу проб води та повітря, щільності забруднення поверхні радіонуклідами.
- Концепція моніторингу російських і американських проектів передбачає контроль тільки прилеглих до станції територій, розділених на три зони:
 - проммайданчик, де знаходиться безпосередньо реактор і інші споруди;
 - санітарно-захисна зона - в радіусі 3 км навколо станції, в якій заборонена будь-яка господарська діяльність (випас худоби, вирощування сільгосппродукції і т.п.);
 - зона спостереження – 30 км, в якій здійснюється ретельний контроль впливу АЕС на навколишнє середовище.

Радіаційний стан зони спостереження станцій контролюється згідно «Регламенту радіаційного контролю АЕС».

Система моніторингу на проммайданчиках АЕС і в прилеглих територіях є невід'ємною частиною системи контролю та управління станцій, що забезпечують їх екологічну безпеку.

Радіаційний моніторинг в районі розміщення АЕС ведеться з моменту закладки проммайданчика, коли виконуються фонові виміри радіоактивності основних природних об'єктів.

Таблиця 2 - Параметри зон спостереження та відповідні їм показники систем контролю радіаційної обстановки АЕС України

Параметр	АЕС					
	Запорізька	Рівненська	Хмельницька	Южноукраїнська	Чорнобильська	
					розширен.	стандарт.
Пункти, один.	36	29	19	11	146	146
Територія, км ²	3000	3000	2826	3000	11304	3000
Населення, тис.чол.	300	130	200	180	200	200
Потужність, МВт	6000	2880	2000	3000	4000	4000
Енергонапруженості, МВт/тис. км ²	2000	960	710	1000	350	1330
Забезпеченість, км ² /пост	83,33	103,4	148,74	272,73	77,42	20,55

Порівнюючи ці показники з даними для європейських станцій по країнам в цілому (див. табл. 1), можна відзначити, що для України в цілому енергонапруженості території відповідає помірним значенням і вдвічі перевищує цей показник для високорозвинутої індустрії США, але при цьому в 2 - 4 рази менше, ніж в розвинених країнах Євросоюзу.

Енергоозброєність населення ядерною енергією однакова з показником для Великобританії і Німеччині.

Територія, контрольована одним постом, в два рази менше ніж в США, але на порядок більше ніж в провідних європейських системах.

Аналогічна картина спостерігається і для кількості населення, що припадає на один пост контролю і контрольованою одним постом встановленої потужності.

Автоматизовані системи контролю за радіаційною обстановкою станцій відрізняються між собою територією, контрольованою одним постом. Найгіршим слід вважати ситуацію на Южно-Українській АЕС, де на один пост контролю доводиться майже 300 км². Найкращим чином справа йде на Запорізькій АЕС і в зоні відчуження.

Зіставляючи їх з аналогічними показниками окремих регіонів Російської Федерації (табл. 3), видно, що для зон спостереження вітчизняних станцій забезпеченість контролю територій в 2 - 8 разів вище, хоча абсолютна забезпеченість постами контролю порівнянна. Зазначену відміну, швидше за все, обумовлено відмінністю розмірів регіонів, прийнятих для порівняння.

Таблиця 3 - Параметри зон спостереження та відповідні їм показники систем контролю радіаційної обстановки АЕС Росії

Параметр	Регіони та АЕС					
	Кольський	Ленінградський	Мурманський	Смоленський	Москва	Курська
Населення, тис.чол.	31	16	23	16	52	29
Потужність, МВт	31,4	15,4	15,4	5,0	7,8	7,8
Енергонапряженності, МВт/тис. км ²	1760	4000	2000	3000	1000	4000
Забезпеченість, км ² /пост	56,1	260	130	597	127	510
Пункти, один.	1,01	0,962	0,669	0,314	0,151	0,271

Висновки. У роботі виконано порівняльний аналіз функціонування систем радіаційного моніторингу на території України і в інших країнах (РФ, країни ЄЕС, США). В результаті виконаного дослідження можна зробити наступні висновки:

- системи радіаційного моніторингу України в частині АЕС базуються на сучасних автоматизованих системах контролю за радіаційною обстановкою;
- забезпеченість територій АЕС, що підлягають спостереженню, відповідає сучасному світовому рівню користувачів ядерної енергії;
- відсутність інформації про засоби моніторингу інших підприємств ядерного паливного циклу дозволяє припускати низький рівень ефективності моніторингу або відсутність як такого

Список використаної літератури

1. IAEA INFORMATION 2010
2. <https://www.iaea.org/PRIS/WorldStatistics/OperationalReactorsByCountry.aspx>
3. <http://www.iaea.org/pris/>
4. Бликс Х. Атомная энергия и окружающая среда // Экологические системы, 2005, № 8, С. 5 - 7.
5. Офіційний веб-сайт ВП «Хмельницька АЕС» www.xaes.org.ua
6. Офіційний веб-сайт ВП «Запорізька АЕС» www.npp.zp.ua
7. Офіційний веб-сайт Рівненської АЕС www.rnpp.rv.ua
8. Чугай А.В., Ковальчук В.И Системы радиационного мониторинга в Украине // Український гідрометеорологічний журнал, 2010, №7, С. 10-15.

O. Dorog, Cand.Sc. (Eng.)

V. Kovaltchuk, Cand.Sc. (Eng.)

Odessa national polytechnic university

SYSTEMS OF RADIATION MONITORING

The analysis of functioning of the systems of the radiation monitoring on the atomic power station of Ukraine is executed. Information about similar systems operating in other countries is analysed. Intercommunication of energy tension of territories and controlled areas is appraised.

Keywords: radiation monitoring, checking system, atomic power station.

Надійшла 01.03.2017

Received 01.03.2017

ТЕХНОЛОГІЇ ТА ОБЛАДНАННЯ В ЕНЕРГЕТИЦІ ENERGY TECHNOLOGIES AND EQUIPMENT

УДК 621.311.001.7(477)

І.А. Чижевська, Радник Міністра
Міністерство енергетики та вугільної промисловості України

МОДЕЛЮВАННЯ НАЙБЛИЖЧОЇ ПЕРСПЕКТИВИ: НОВІТНІ ГРАВЦІ, ФУНКЦІЇ ТА ТЕХНОЛОГІЇ В ЕНЕРГЕТИЦІ КРАЇНИ

В Україні розпочата глибока енергетична трансформація. Вже імplementовано законодавство про державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг, про функціонування ринку природного газу; до другого читання готується законопроект про ринок електричної енергії. В активній стадії знаходиться підготовка новітньої Енергетичної стратегії - тривають обговорення, обмін думками та підготовка пропозицій та зауважень до неї.

Однак найглибші зміни енергетичного сектору України це попереду. Industrial revolution -4.0, найновітніші розробки і технології, інноваційні досягнення розвинутих енергетичних ринків світу наразі набирають непереборної сили та діють одночасно; вони підсилюють та прискорюють потребу в ще більш радикальній трансформації енергетичного сектору.

Треба розпочати дискусію з децю неочікуваного погляду для професійних енергетиків: головної орієнтації перетворень на кліматичні зміни, на енергетичну безпеку, що приходить через відмову від неефективного викопного палива, на досягненні гнучкості енергосистеми через smart технології, на оптимізації цін для кінцевих споживачів через формулу solar + storage = prosumer, на стимулюванні нових складових забезпечення конкуренції.

Ключові слова: Smart Technologies, Energy Storage, Electric Vehicle, гнучка енергосистема, новітні учасники ринку.

Вступ. Модель ринку електричної енергії, запропонована законопроектом, що був ухвалений у минулому році у першому читанні, передбачає роботу декількох сегментів ринку для здійснення купівлі-продажу електроенергії, всім відомих учасників ринку, зрозумілі правила роботи і участі в цих ринках, а також формування ринкових цін на електроенергію, та повністю відповідає вимогам Третього енергетичного пакету ЄС.

Проте час приніс зміни та новели, які не передбачалися ще декілька років тому навіть в найбільш оптимістичних прогнозах авторитетних відомств. Завдяки новітній технологічній революції на економічну арену виходять вже частково знайомі Smart Grids, Smart Metering, Smart Appliance та нові електричні технології, операційні елементи та інструменти управління: Electric Vehicle (EV) та e-mobility (електротранспорт та його використання), Electric Vehicle Charge Station (EVCS) та Vehicle-to-Grid (V2G) (станції зарядки електротранспорту та взаємодія електротранспорту і електромережі), Energy Storage, Demand Side Response (управління попитом з боку споживача), Big Data, Blockchain, які вже розпочали свою «революцію» у функціонуванні енергетичних систем, змінюють стратегію та ринкову поведінку всіх учасників та вводять нових гравців.

Вказані вище терміни - це вже звичне явище для розвинутих країн світу. Вони дуже швидко відреагували на новітні тренди, оцінили всі їх переваги, провели слухання стосовно стратегій подальшого розвитку та вже приступили до етапу імplementації, який має зняти всі бар'єри виходу інноваційних технологій на ринки. Серед цих новітніх елементів є один, на нашу думку, дуже «цінний» - це Energy Storage, оскільки з його використанням створюються переваги для кожного сегменту енергетичної системи: 1) підвищується ефективність енергосистеми, її стабільність, надійність і стійкість електричної мережі; 2) зростає само-споживання та само-виробництво електроенергії; 3) покращується доступ до електроенергії шляхом автономної електрифікації; 4) змінюється характер суспільних відносин, зменшується залежність від монополістів, енергетичних «монстрів» - власників палива.

Взагалі система накопичення та зберігання енергії налічує багато технологій, які знаходяться на різних стадіях розвитку, від найбільш зрілих (гідроакумуляування енергії, підземне акумулювання теплової енергії) та таких, що вже переходять на етап комерційного їх використання (технології акумулювання електроенергії у вигляді стислого повітря та акумуляторні батареї) до технологій, що

знаходяться на ранній стадії свого розвитку (проточні батареї, зберігання енергії з використанням магнітів надвисокої провідності (SMES), ультраконденсатор, та інші види батарей). В залежності від особливостей (розмір, потужність, тривалість) роботи вказаних технологій можемо їх згрупувати в три категорії: I - короткотермінове застосування (від секунд – до хвилин); II – коротко та довготермінове застосування; III – довготермінове застосування (від годин - до сезонів).

Цією статтею ми хотіли б привернути до увагу до найбільш «універсальної» технології Energy Storage – акумуляторні батареї, яка може працювати чи сама по собі, чи в поєднанні з генерацією електроенергії, чи на боці споживача. Ми не претендуємо на об'єктивність наших судження, а маємо на меті цією статтею спонукати до початку дискусії стосовно перспектив розвитку в українських реаліях новітніх електричних технологій взагалі та Energy Storage, зокрема

Результати досліджень

Отже, в розвинутих країнах світу нові електричні технології та елементи переходять з категорії рідких опцій і пілотних проектів в розряд «звичайних» проектів. Тут доречно навести практичні кроки, зроблені Великобританією, Сполученими Штатами Америки, Австралією та Німеччиною в напрямку розвитку Energy Storage.

Так, на початку цього року Урядом Великобританії була опублікована Зелена книга «Нова промислова стратегія», яка наголошує на розвитку технологій накопичення та зберігання енергії для підтримки розвитку інтелектуальних енергетичних систем та електромобільної промисловості. Уряд ставить перед собою завдання зробити країну лідером в дослідженнях, проектуванні та розробці систем накопичення та зберігання енергії. До цього в країні сталася важлива подія, яка набула широкого обговорення, як на суспільному рівні, так і в політичному середовищі, - це результати конкурсу 2016 року на відбір проектів для забезпечення потужності у зимовий період 2020/21 рр. Серед відібраних проектів неочікуваним було побачити проекти зберігання енергії, які забезпечать 3.2 ГВт або 6% всієї зарезервованої потужності. З них 500 МВт - це нове будівництво промислових накопичувачів енергії.

Тим же часом у США компаніями Tesla, Altagas Ltd. і AES Corp вже побудовано три промислових накопичувача енергії на основі літій-іонних акумуляторів, кожен з яких за обсягами перевищує будь-який з раніше побудованих батарейних накопичувачів. У сукупності їх потужність відповідає приблизно 15% потужності накопичувачів, встановлених в 2016 р. у всьому світі. Найбільший з об'єктів – це накопичувач від AES Corp. потужністю 30 МВт і ємністю 120 МВт*г. (на основі елементів Samsung). Важливо, що всі проекти були реалізовані в стислі терміни - менш, ніж за шість місяців, особливо відзначилася Tesla, яка спроектувала і побудувала промислову систему зберігання енергії лише за три місяці. Це одна із значних переваг батарейних накопичувачів.

Знакові зміни відбулися у 2016 році і в секторі побутового споживання та зберігання електроенергії. В Австралії встановлена потужність побутових систем зберігання сонячної енергії зросла в 13 разів, за рік було встановлено 6 750 систем зберігання - це означає, що кожного робочого дня в країні встановлювалося 27 систем, а кожної робочої години відповідно – 3.3 системи. До кінця поточного року країна планує довести встановлену потужність систем зберігання енергії до 200 ГВт*г. А нещодавно в тестовому режимі в країні запрацювала перша децентралізована біржа з торгівлі електроенергією. Це означає, що незабаром австралійські домогосподарства-власники сонячних панелей і батарей зможуть об'єднатися між собою для створення «віртуальних» електростанцій та продавати надлишки електроенергії в мережу. Тобто, домогосподарство отримало професійний майданчик, який надає їм можливість «почати думати та діяти по-новому» - як продуктивний споживач, споживач-професіонал (prosumer) та своїми діями впливати на стабільність енергосистеми, і це новий потужний гравець енергоринку, значення якого важко переоцінити. Для нашої країни це може стати економічним базисом реальних демократичних перетворень – формування мережевого суспільства замість застарілого консервативного дизайну ринку, де правлять великі енергетичні монополії.

Наразі, Німеччина має один з найбільших в світі ринків побутового зберігання електроенергії (на кінець 2015 року можливості побутового зберігання електроенергії становили 67 МВт, в країні налічувалось 19 000 систем зберігання енергії). Швидке зниження цін на системи зберігання та державна програма стимулювання їх розвитку роблять в Німеччині привабливою для широкого застосування технологію «сонячна енергія + збереження». За аналітичними даними протягом наступних 5 років ринок побутового зберігання електроенергії в країні зросте в 11 разів з точки зору потужності накопичувачів.

Менш, ніж за рік Tesla удосконалила свою настінну акумуляторну батарею, подвоївши її потужність та зменшивши розмір на третину, та запропонувала ринку модель PowerWall2, її ціна є вдвічі нижчою від попередньої. Встановлення такої акумуляторної батареї 14кВт*г до вже інсталюваної сонячної системи коштуватиме \$10 000 в той час, як встановлення повної комплектації «сонячна енергія + збереження» починатиметься з \$15 000.

Інший виробник - корейська LG Chem – вже пропонує повну комплектацію «сонячна енергія + збереження» з акумуляторною батареєю 6.4 кВт*г за \$ 5 900 (а в квітні минулого року лише одна батарея

коштувала \$ 7 500). Наразі виробник також пропонує домогосподарствам літій-іонний акумулятор 9.8 кВт*г.

Неменше вражаючим та революційним є ще один елемент – це електромобіль. І це вже не просто транспортний засіб, це новий елемент електромережі, новий гравець ринку. При впровадженні технології Vehicle-to-grid (V2G) електромобілі почнуть докорінно змінювати ринок, відігравати нову роль у балансуванні енергосистеми, накопичуючи, зберігаючи та віддаючи назад в мережу електроенергію. Чи могли ми уявити ще декілька років тому, що новим елементом в електромережі, який підвищує надійність, а також гравцем, що знижує втрати та оптимізує ринкові ціни на електроенергію, та дозволяє вирішити низку технічних проблем, пов'язаних з переходом на відновлювані джерела енергії (ВДЕ), стане електромобіль? Прогнозується, що електромобілі досягнуть вартісного паритету з бензиновими / дизельними автомобілями вже в 2020 році, а в 2035 році складатимуть 35% від всього глобального автопарку. Відповідно у довгостроковій перспективі (до 2050 року) світова електроенергетика буде вже докорінно переформатована в суперінтелектуальну мережу.

Зрозуміло, що для розгортання будь-якої нової технології необхідна нормативно-правова база, а оскільки системи накопичення та зберігання енергії, це не просто нові технології, а «революційні» технології, то і підходи до формування нормативно-правової бази мають бути інноваційні. Технологія Energy Storage породжує не просто нових повноцінних учасників ринку, вона породжує «універсальних» учасників, що можуть працювати на всіх організованих ринках (електроенергії, потужності та допоміжних послуг). Вони здатні забезпечити реальну конкуренцію та сприяти встановленню справедливих і розумних цін, на кожному з цих ринків.

Так, великі електричні накопичувачі вбачаються вагомим доповненням до технології гідроакумуляування енергії. Доречною є їх робота на ринках допоміжних послуг, а перевага їх в порівнянні з ГАЕС – це швидке будівництво будь-де, де є така потреба, та без шкоди природі і екології. Вони також можуть бути звичайними гравцями на ринку двосторонніх договорів, біржі. Надзвичайною є їх роль в комплексній роботі разом сонячною та вітряною станцією – вони змінять їх природу та допоможуть працювати стало і «не дратувати системного оператора своєю переривчатістю». Споживачі реально змінять графік споживання та відповідно оптимізують свої витрати на електроенергію за допомогою системи «solar+storage» «за лічильником»; це реальний інструмент зниження політичних баталій відносно кінцевих цін для споживачів.

Уявіть собі тисячі потужних споживачів – prosumers, мільйони домогосподарств та EV, сотні нових гравців – власників накопичувачів, які разом з ВДЕ примусять класичну енергетику відійти у минуле. Іншими словами нова нормативно-правова база має бути адаптована та узгоджуватися з трьома новими бізнес-моделями: перша - об'єднує нові елементи навколо підтримки енергосистеми; друга - передбачає суміщення нових елементів з проектами відновлюваної енергетики; третя модель – це елементи та проекти, що знаходяться «за лічильником».

Наразі існуючі правила роботи всіх організованих ринків не передбачають та не описують вищевказані бізнес-моделі, навпаки здебільшого вони створюють бар'єри та обмежують вихід на ринки нових гравців, оскільки розроблялися за часів, коли ринок був представлений лише «традиційними» учасниками. В цьому контексті заслуговує на увагу спроба FERC (енергетичний регулятор США) зняти бар'єри для участі систем накопичення та зберігання енергії в організованих ринках. Важливі з нашої точки зору твердження ми узагальнили та, користуючись нагодою, хочемо стисло навести деякі з них.

Для початку слід систематизувати всі системи накопичення та зберігання енергії, це полегшить розробку заходів для зняття бар'єрів виходу та в подальшому дозволить ефективно інтегрувати нові елементи в організовані ринки. Наприклад, FERC виділила два види систем накопичення та зберігання енергії: Electric Storage Resource (ESR) - ресурс електричного зберігання та Distributed Energy Resource (DER) - розподілений енергетичний ресурс.

ESR здатний отримувати електроенергію з мережі та зберігати її для пізнішої віддачі в мережу незалежно від того, де в енергосистемі розміщений цей ресурс. Він включає всі види технологій зберігання електроенергії незалежно від їх розміру, носія (акумуляторні батареї, стиснене повітря, гідроакумуляування), а також розміщення (чи в системі електропередачі, чи в системі розподілу).

DER, в свою чергу, – це джерело або споживач енергії, які знаходяться в системі розподілу (тобто будь-яка підсистема) або «за лічильником» споживача. Цей ресурс може включати ресурс електричного зберігання, а також розподілену генерацію, акумуляування теплової енергії, електромобілі та пристрої живлення.

Серед заходів для зняття бар'єрів виходу ESR на організовані ринки ми виділяємо шість основних: 1) має бути створена модель участі, яка розпізнає особливі фізичні та операційні характеристики ESR та надає їм відповідне право; 2) діючі технічні вимоги мають бути переглянуті та розширені для ESR; 3) заявка ESR на ринку має бути відмінна від тієї, що подається «традиційною» установкою, оскільки з урахуванням тривалості та можливостей зарядки та розрядки ESR, вони є значно гнучкішими; 4) необхідно врахувати можливості ESR працювати на ринку як з позиції оптового продавця, так і з позиції оптового

покупця електроенергії, та надати їм право вільно обирати свою стратегію роботи; 5) необхідно встановити вимоги щодо мінімального розміру ESR для участі в оптовому ринку, який би дозволив в повній мірі використовувати операційні можливості ESR та відповідно отримувати переваги від зростання конкуренції (мінімальний розмір установок ESR, який вважається FERC доцільним для участі в оптовому ринку, складає 100 кВт); 6) має бути визначено підхід до ціноутворення на електроенергію, що продається на організованих ринках установкам ESR з метою її зберігання та наступного перепродажу на цих ринках.

Щодо DER, то нам вбачаються важливими п'ять заходів, які би унеможливили бар'єри на шляху їх впровадження. По-перше, необхідно надати DER право участі в організованих ринках шляхом їх агрегації; для агрегації має бути використаний географічний підхід. По-друге, розробити параметри заявки для того, щоб в ній містилася інформація щодо джерел та відповідних обсягів електроенергії, які ввійшли до загальної заявки агрегованого DER; встановити вимоги до інформації та даних для агрегованого DER (зокрема, мова йде про інформацію щодо кожного розподіленого енергетичного ресурсу, його потужність, місцезнаходження, експлуатаційні межі). По-третє, визначити підходи, що застосовуються при виставленні вимог до системи обліку та телеметрії індивідуального DER та агрегованого DER. По-четверте, забезпечити необхідну координацію дій між оператором системи передачі, оператором системи розподілу, агрегованим DER та компанією з розподілу електроенергії. І на останнє, розробити типовий договір про участь агрегованого DER на ринку, яким би агрегований DER, гарантував, що кожен його індивідуальний ресурс відповідає діючим правилам, нормам та операційним процедурам.

На перший погляд здається, що все вищеприписане може розвинуватися, впроваджуватися та працювати в Сполучених Штатах Америки, Великобританії, Німеччині, та не може бути в Україні, бо для нашої країни це «не на часі», як полюбляють говорити деякі фахівці. Однак зарубіжні експерти вже й без нас змоделювали українську енергетичну систему 2050 року, що функціонує на основі 100% ВДЕ, як частину світової, та замість нас вже відповіли на запитання чи може працювати українська енергетика в умовах використання новітніх технологій. Відповідь - так. Ця модель демонструє, як у 2050 році може бути організована енергосистема, вона також розвінчує міф щодо неможливості функціонування системи без базових потужностей АЕС та ТЕС, та щодо нестабільності та нерегулярності системи лише на основі 100% ВДЕ.

Оптимальну енергосистему на основі 100% ВДЕ вчені спробували визначити, використавши модель, засновану на лінійній оптимізації параметрів енергосистеми при заданих обмеженнях. Критерієм оптимізації була мінімізація сумарної річної вартості енергосистеми з урахуванням передбачуваного технічного розвитку та вартості технологій на 20-30 років, та стосувалася як енергетичного сектору, так і додаткових секторів, які забезпечують гнучкість попиту на електроенергію. В результаті, був запропонований оптимальний з точки зору вартості, потужності та щогодинного виробництва мікс розподілених та централізованих технологій генерації та зберігання електроенергії. Оптимально поєднавши генерацію електроенергії, її зберігання та мережеве з'єднання кожної з 20-ти регіональних енергосистем Європи автори моделі передбачають вартість електроенергії на рівні 55-70 євро за МВт*год. в регіональних енергосистемах.

Виробництво електроенергії здійснюватиметься наземними фотоелектричними системами (з жорсткою фіксацією та з трекерною системою) та вмонтованими на дахах будинків, наземними вітряними станціями, гідроелектростанціями (русловими та греблевими), станціями, що працюють на біомасі (тверда біомаса та біогаз), електростанціями, що працюють на відходах, а також об'єктами, що використовують геотермальну енергію. Пропонуються такі технології зберігання енергії: акумуляторні батареї, ГАЕС, зберігання електроенергії у вигляді стислого повітря, зберігання у вигляді теплової енергії (технологія Power-to-Heat), зберігання у вигляді газу (технологія Power-to-Gas, вказана технологія передбачає отримання синтетичного газу з допомогою електролізу води, метанізації, установок для очищення повітря від вуглекислот, зберігання отриманого синтетичного газу, а також газотурбінні установки комбінованого та відкритого циклів, що використовують синтетичний газ).

Як бачимо, в моделі відсутні взагалі традиційні технології виробництва електроенергії шановані багатьма українськими енергетиками. При цьому, якщо ми достатньо добре уявляємо, що таке технології виробництва електроенергії з ВДЕ, то технології зберігання енергії здаються неосяжними для більшості з нас навіть з точки зору розуміння.

Для покриття внутрішнього попиту на електроенергію, який прогнозується у 2050 році на рівні 226 млрд. кВт*год., передбачається, що 86% електроенергії буде вироблено об'єктами вітрової та сонячної енергетики, а 14% - гідроелектростанціями, газотурбінними установками комбінованого та відкритого циклів (технологія Power-to-Gas), а також установками, що працюють на біомасі та відходах.

Використавши запропоновану модель, ми спробували визначити можливу структуру енергогенеруючих потужностей у 2050 році - це майже 160 ГВт відновлюваних потужностей, з яких: 90 ГВт - це наземні та вмонтовані на дахах будинків фотоелектричні станції, 44 ГВт - вітрові електростанції, 13 ГВт - газотурбінні установки комбінованого та відкритого циклів, що використовують синтетичний газ

(Power-to-Gas), 7 ГВт – гідроелектростанції, 6 ГВт - електричні станції, що працюють на біомасі та відходах.

Ми також спробували охарактеризувати нового для нашої енергосистеми суб'єкта та гравця - Energy Storage. Модель передбачає здатність енергосистеми з допомогою Energy Storage покривати протягом року до 35% попиту на електроенергію, тобто кожну третю кіловат-годину, що споживатиметься, 17% при цьому або кожна шоста кіловат-година споживання покриватиметься за рахунок акумуляторних батарей. Для порівняння зараз в Україні за рахунок ГАЕС в години нічного провалу акумулюється близько 14% електроенергії, а в години максимального навантаження покривається близько 8% споживання.

Відповідно до поглядів закордонних енергетичних експертів основними технологіями Energy Storage, на які опиратиметься українська енергосистема 100% ВДЕ будуть акумуляторні батареї, що забезпечать коротко - термінове зберігання електроенергії, та технологія Power-to-Gas, що буде значним ресурсом сезонного зберігання після 2035 року. Після 2040 року, тобто вже майже через 20 років, в українській енергосистемі домінуватимуть сонячні фотоелектричні системи та акумуляторні батареї (у тому числі у формі взаємодії електротранспорту і електромережі (V2G connections).

Провівши нескладні розрахунки без потужного програмного забезпечення можемо підтвердити високу вірогідність такого сценарію. Умовно, якщо у короткостроковій перспективі:

- всі побутові споживачі, які споживають >300 кВт*год. на місяць, встановлять в своїх будівлях акумуляторні батареї, та змінять графіки споживання, споживаючи електроенергію з мережі (заряджаючи акумулятор) виключно вночі, та використовуючи протягом дня виключно акумульовану, то за нашими підрахунками нічний провал в енергосистемі зменшиться на 8%;

- хоча б половина невеликих непобутових споживачів (з річним споживанням до 10 млн.кВт*год.) здійснили аналогічні дії, то нічний провал в енергосистемі зменшиться ще на 12%;

- існуючі можливості з акумулювання електроенергії (а це 1,5 ГВт діючих потужностей ГАЕС) в енергосистемі потрояться за рахунок промислових накопичувачів енергії, то пікове навантаження в енергосистемі буде зменшено на 15%.

Висновки. Історично традиційна електроенергетична галузь та її консервативні ринки тривалий час шли шляхом еволюційного розвитку. Наразі в світі відбувається революційний енергетичний стрибок. Електроенергетика стає «суперкомп'ютером» (у тому числі на колесах), галуззю суперінтелектуалів. Вона реально здатна забезпечити не тільки енергетичну безпеку та незалежність, а й безпечний клімат та здоров'я майбутнім поколінням. Справедливі ціни в ній забезпечуються не лише за рахунок конкуренції, а й за рахунок інноваційних технологій та нових бізнес-моделей, в яких межі та відмінності між виробниками і споживачами поступово зникають.

Національне енергетичне законодавство та імплементація Третього Енергетичного пакету в існуючому вигляді без врахування революційного стрибка – це вже минуле, в яке ми йдемо з минулого. Робота щодо «легітимізації» в національному законодавстві нових електричних технологій, операційних елементів та інструментів управління має початися вже сьогодні. Нова термінологія, посилання на нові технічні правила експлуатації та опис нових бізнес-моделей мають міститися вже в законопроекті 4493 «Про ринок електричної енергії України», що готується до другого читання. Вже сьогодні українські вчені та фахівці мають бути залучені до роботи з вивчення, оцінки та підготовки всіх необхідних технічних аспектів, вимог та обґрунтувань, після чого має початися етап широкої інтеграції нових технологій та операційних елементів в енергетичну систему та організований ринок України.

Список використаної літератури

1. Ринок домашніх накопичувачів сонячної енергії у Австралії зріс на 1000% у 2016 році [Електронний ресурс] // Ecotown / від 23.02.2017. – Режим доступу: <http://ecotown.com.ua/news/Rynok-domashnikh-nakopychuvachiv-sonyachnoyi-enerhiyi-u-Avstraliyi-zris-na-1000-u-2016-rotsi/>

2. Australian consortium launches world-first digital energy marketplace for rooftop solar [Електронний ресурс] // The guardian / від 22.02.2017. – Режим доступу: <https://www.theguardian.com/sustainable-business/2017/feb/23/australian-consortium-launches-world-first-digital-energy-marketplace-for-rooftop-solar>

3. Department for Business, Energy and Industrial Strategy: Building our Industrial Strategy: Green Paper, January 2017 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://beis.gov.uk.citizenspace.com/strategy/industrial-strategy/supporting_documents/buildingourindustrialstrategygreenpaper.pdf

4. Energy companies are dead already, they just haven't realised it solar [Електронний ресурс] //Renew Economy / від 02.08.2016. - Режим доступу: <http://reneweconomy.com.au/energy-companies-are-dead-already-they-just-havent-realised-it-97738/>

5. Energy storage: More tenders, government priorities and solving the revenue stream dilemma [Електронний ресурс] // Solar Power Portal / від 02.02.2017. – Режим доступу:

http://www.solarpowerportal.co.uk/blogs/energy_storage_more_tenders_government_priorities_and_solving_the_revenue_s?utm_source=rss-feeds&utm_medium=rss&utm_campaign=general

6. *Gabor Szorenyi*. Innovation and energy regulation incl. ERRRA Survey Report 2016, May 2016 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://library.erranet.org/>

7. *István Tácz*. Overview of the Energy Storage Possibilities to Support the Electrical Power System: Research Paper to assist the ERRRA Licensing and Competition Committee, July 2016 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://library.erranet.org/>

8. Morgan Stanley: Storage in the Utility Sector ‘Will Grow More Than the Market Anticipates’ [Електронний ресурс] // Greentech Media / від 08.02.2017. – Режим доступу: <https://www.greentechmedia.com/articles/read/morgan-stanley-deems-energy-storage-underappreciated-expects-big-growth-in>

9. Storage secures 3.2 GW of Capacity Market contracts in auction success [Електронний ресурс] //Solar Power Portal / від 09.12.2016. – Режим доступу: http://www.solarpowerportal.co.uk/news/battery_storage_secures_3.2gw_of_capacity_market_contracts_in_auction_succe?utm_source=rss-feeds&utm_medium=rss&utm_campaign=general

I. Chyzhevska, Advisor to Minister

Ministry of Energy and Coal Industry of Ukraine

SHORT-TERM MODELING: THE NEWEST PLAYERS, FUNCTIONS AND TECHNOLOGIES IN UKRAINIAN ENERGY SECTOR

Ukraine has begun a deep energy transformation. The legislation on the state regulation of energy and utilities, on the natural gas market has been already implemented; a bill on the electricity market is being prepared for the second reading. The modern energy strategy is in the active stage of the preparation – there are ongoing discussions, exchange of opinions and preparation of proposals and amendments thereto.

But the most profound changes in the energy sector of Ukraine are yet to come. Industrial revolution -4.0, state-of-the-art development and technologies, innovative achievements of the world leading energy markets are now gaining irresistible force and operating simultaneously; they intensify and accelerate the need for more radical transformation of the energy sector.

We must begin the discussion from the point of view, that is little bit unexpected for professional energy specialists: the main orientation transformations on climate change; on energy security, that comes through rejection of inefficient fossil fuel; on flexibility of grid, that is achieved through the smart technologies; on price optimization for consumers through a formula solar + storage = prosumer; on stimulation of new market components to ensure competition.

Keywords: Smart Technologies, Energy Storage, Electric Vehicle, flexible grid, new market participants

References

1. Australia’s household solar-plus-storage market grew more than 1000% in 2016 [Online] // Ecotown / 23.02.2017. – available at: <http://ecotown.com.ua/news/Rynok-domashnikh-nakopychuvachiv-sonyachnoyi-enerhiyi-u-Avstraliyi-zris-na-1000-u-2016-rotsi/> (Ukr)

2. Australian consortium launches world-first digital energy marketplace for rooftop solar [Online] // The guardian / 22.02.2017. - available at: <https://www.theguardian.com/sustainable-business/2017/feb/23/australian-consortium-launches-world-first-digital-energy-marketplace-for-rooftop-solar>

3. Department for Business, Energy and Industrial Strategy: Building our Industrial Strategy: Green Paper, January 2017 [Online]. – Режим доступу: https://beis.gov.uk/citizenspace.com/strategy/industrial-strategy/supporting_documents/buildingourindustrialstrategygreenpaper.pdf

4. Energy companies are dead already, they just haven’t realised it solar [Online] //Renew Economy / від 02.08.2016. - available at: <http://reneweconomy.com.au/energy-companies-are-dead-already-they-just-havent-realised-it-97738/>

5. Energy storage: More tenders, government priorities and solving the revenue stream dilemma [Online] //Solar Power Portal / 02.02.2017. – available at:

http://www.solarpowerportal.co.uk/blogs/energy_storage_more_tenders_government_priorities_and_solving_the_revenue_s?utm_source=rss-feeds&utm_medium=rss&utm_campaign=general

6. *Gabor Szorenyi*. Innovation and energy regulation incl. ERRA Survey Report 2016, May 2016 [Online]. – available at: <http://library.erranet.org/>

7. *István Táczai*. Overview of the Energy Storage Possibilities to Support the Electrical Power System: Research Paper to assist the ERRA Licensing and Competition Committee, July 2016 [Online]. – available at: <http://library.erranet.org/>

8. Morgan Stanley: Storage in the Utility Sector ‘Will Grow More Than the Market Anticipates’ [Online] // Greentech Media / 08.02.2017. – available at: <https://www.greentechmedia.com/articles/read/morgan-stanley-deems-energy-storage-underappreciated-expects-big-growth-in>

9. Storage secures 3.2 GW of Capacity Market contracts in auction success [Online] //Solar Power Portal / 09.12.2016. – available at:

http://www.solarpowerportal.co.uk/news/battery_storage_secures_3.2gw_of_capacity_market_contracts_in_auction_succe?utm_source=rss-feeds&utm_medium=rss&utm_campaign=general

УДК 621.311.001.7(477)

И.А. Чижевская, Советник Министра

Министерство энергетики и угольной промышленности Украины

МОДЕЛИРОВАНИЕ БЛИЖАЙШЕЙ ПЕРСПЕКТИВЫ:

НОВЕЙШИЕ ИГРОКИ, ФУНКЦИИ И ТЕХНОЛОГИИ В ЭНЕРГЕТИКЕ СТРАНЫ

В Украине начата глубинная энергетическая трансформация. Уже принято законодательство о государственном регулировании в сфере энергетики и коммунальных услуг, о функционировании рынка природного газа; ко второму чтению готовится законопроект о рынке электроэнергии. В активной стадии находится подготовка новой Энергетической стратегии - продолжаются обсуждения, обмен мнениями и подготовка предложений и замечаний к ней.

Однако самые глубокие изменения энергетического сектора Украины ждут впереди. Industrial revolution 4.0, новейшие разработки и технологии, инновационные достижения развитых энергетических рынков мира сейчас набирают непреодолимой силы и действуют одновременно; они усиливают и ускоряют потребность в еще более радикальной трансформации энергетического сектора.

Необходимо начать дискуссию с несколько неожиданной точки зрения для профессиональных энергетиков: главной ориентации преобразований на климатические изменения, на энергетическую безопасность, которая достигается путем отказа от неэффективного ископаемого топлива, на достижение гибкости энергосистемы за счет smart технологий, на оптимизацию цен для конечных потребителей через формулу solar + storage = prosumer, на стимулирование новых составляющих, которые обеспечивают конкуренцию.

Ключевые слова: Smart Technologies, Energy Storage, Electric Vehicle, гибкая энергосистема, новейшие участники рынка

Надійшла 14.03.2017

Received 14.03.2017

В.В. Высочин, канд. техн. наук, доц.
Одесский национальный политехнический университет

ИНФОРМАЦИОННЫЕ АСПЕКТЫ ВНЕДРЕНИЯ СИСТЕМ КОНТРОЛЯ И ПЛАНИРОВАНИЯ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ НА КОТЕЛЬНЫХ ЦСТ

Проведены численные исследования нестационарных процессов теплообмена в гелиосистеме с тепловым насосом и сезонным аккумулятором тепла с 9 грунтовыми вертикальными теплообменниками в процессе периодической, с суточным циклом, зарядки в летний период и разрядки в зимний. Математическая модель включает уравнения, описывающие условия прихода и преобразования солнечной энергии в гелиоколлекторе, теплообмен в грунтовых тепло-обменниках в трехмерном массиве грунта и процессы в тепловом насосе. Показана необходимость учета взаимного влияния грунтового теплообменника и теплового насоса, а также - возможность повышения эффективности аккумулятора путем выбора рационального шага куста и количества активных теплообменников в заданной структуре. Предложены рекомендации по выбору расчетной отопительной нагрузки и организации работы теплового насоса при условии полного обеспечения потребителя тепла в течение всего зимнего периода.

Ключевые слова: сезонный аккумулятор, гелиосистема, тепловой насос.

Введение. Гелиосистемы, предназначенные для отопления, как правило, включают сезонные аккумуляторы тепла и тепловые насосы (ТН). Наилучшими эксплуатационными показателями грунтовых аккумуляторов (ГА) выделяются вертикальные многозондные (кустовые) конструкции [2,4,5]. Зонды представляют собой трубчатые теплообменники, расположенные в скважинах. Кустовые структуры ГА различаются пространственным размещением, количеством зондов и размерами теплообменников. Перечисленные структурные факторы определяются условиями работы ГА в грунте, а также сопряженной гелиосистемы. Существенная нестационарность работы гелиосистемы усложняет исследования, в связи с чем в настоящее время отсутствуют надежные рекомендации по выбору рациональных параметров кустовых структур, в частности, конфигурации куста в плане, шага размещения зондов, длины теплообменников, а также характеристик сопряженных элементов системы: теплового насоса и поля гелиоколлекторов.

Анализ последних исследований и публикаций. Обычно структуру ГА предлагается выполнять в виде прямоугольного в плане куста с равным шагом между зондами. Однако параметры конструкции задаются из произвольных соображений [3,4]. В соответствии с данными [5] шаг расположения зондов в кусте оказывает влияние на количество накопленного в грунте тепла. Увеличение шага приводит к росту теплосодержания массива. Однако увеличение шага приводит к уменьшению уровня температур в грунте. В [5] показано, что с учетом этих двух факторов при зарядке ГА компромиссным для различных грунтов может быть выбран шаг равный 4,0 м, как соответствующий хорошей тепловой наполняемости ГА и достаточно высокой температуре.

Еще одним фактором влияния на эффективность закачки тепла является число активных зондов в кусте. Одиночный зонд существенно проигрывает кустовым ГА [2,5]. Вместе с тем существует рациональное количество зондов, влияющих на формирование температурного поля между ними. В [5] показано, что при переходе от пятизондового центросимметричного куста к девятизондовому, когда включаются в работу периферийные теплообменники, тепловая наполняемость ГА улучшается незначительно. Это объясняется перестройкой температурного поля в направлении снижения градиента температур, влияющего на теплообмен зондов и грунта. В результате, несмотря на увеличение теплообменной площади куста, теплоотдача отдельных теплообменников в девятизондовом кусте ниже, чем в пятизондовом. К тому же куст из пяти зондов при заданном шаге требует одну из самых низких удельную площадь гелиоколлекторов, определенную как отношение суммарной площади солнечных коллекторов к максимальному (пиковому) количеству тепла, накопленного в грунте [5]. Однако эти результаты, полученные при закачке ГА, для условий разрядки использованы быть не могут.

Целью работы является определение рациональных параметров структуры кустового ГА, работающего в режиме полного цикла зарядки и разрядки в сопряжении с гелиосистемой и ТН, и нагрузочных характеристик системы на основе математической модели с многофакторной целевой функцией.

Изложение основного материала. Для исследований принят ГА, состоящий из 9 вертикальных параллельно включенных теплообменников коаксиального типа высотой h и шагом расположения S . Теплообменники (зонды) в плане расположены по прямоугольной схеме 3×3 . Теплообмен в грунтовом теплообменнике описан системой дифференциальных уравнений энергетического баланса в трубах и теплоносителях [1], в грунте - уравнением нестационарной теплопроводности в прямоугольных координатах в трехмерной постановке [5]. Система уравнений решалась конечно-разностным методом. Материал труб теплообменника – пластик, диаметр внешних труб в соответствии с [5] принимался равным 180 мм. Теплоноситель – вода, в соответствии с этим охлаждение теплоносителя в испарителе ТН ограничивалось по условию недопущения фазового перехода.

В принятой постановке исследования учитывалось изменение температуры теплоносителя, циркулирующего между зондами и испарителем ТН. Влияние этого фактора отражается на эффективности работы испарителя, а также конденсатора ТН, что связано с изменением температурного режима в этих элементах и, как следствие, с соотношением размеров характерных зон подогрева и кипения, охлаждения и конденсации. Поэтому в общей системе уравнений использованы модельные соотношения, полученные в результате проведенных исследований нестационарной работы ТН с хладагентом R-12, которые позволяют определять характеристики ТН в переменных условиях.

Сопряжение грунтового теплообменника с гелиоколлекторами осуществлялось введением в расчетную модель системы уравнений, описывающих условия прихода и преобразования солнечной энергии в гелиоколлекторе [5]. Климатические условия работы гелиосистемы конкретизировались координатами одесского региона в период, который начинался 15 апреля (окончание отопительного сезона) и заканчивался через 6 месяцев (180 суток). Для исследования приняты современные плоские гелиоколлекторы с приведенной характеристикой $U/(\tau\alpha) = 4,4 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{К})$, где U – коэффициент потерь тепла; $(\tau\alpha)$ – оптическая характеристика гелиоколлектора.

В результате решения системы уравнений математической модели определялись температурные поля в теплообменнике и грунтовом массиве, теплосодержание массива грунта, температура и скорость циркулирующего в гелиосистеме теплоносителя в развертке суточной и сезонной работы системы теплоснабжения. Режим работы системы моделировался последовательной зарядкой ГА при работе гелиоколлекторов в летний период и разрядкой ГА в зимний период. Итерационным расчетом процесса закачки тепла определялась общая площадь гелиоколлекторов, тепловая производительность которых отвечала критерию заданной максимальной скорости теплоносителя (2 м/с) в грунтовых теплообменниках при фиксированной температуре теплоносителя на входе в теплообменник. Размеры поля гелиоколлекторов определяли температурное поле в грунте. Также итерационным методом определялись расчетная тепловая нагрузка отопления (Q_o) и расчетная (номинальная) тепловая нагрузка испарителя ТН (Q_n). Расчетная характеристика Q_o определялась по условию удовлетворения ежедневного графика тепловой нагрузки потребителя в течение всего периода отопления на протяжении 180 суток. Алгоритм модели позволял учитывать отпуск тепла потребителю в режиме «пропусков» - в зависимости от температуры теплоносителя на выходе из грунтового теплообменника. Нижними критериями определения Q_o являлись либо суточный недостаток тепла (недотоп), либо достижение минимальной температуры грунта – фоновой на среднем расстоянии между зондами и на глубине равной полувысоте зонда.

Исследования показали зависимость расчетной отопительной нагрузки при одних и тех же конструктивных характеристиках ГА и сопряженной с ним гелиосистемы от мощности ТН (рис.1, зонды глубиной 10 м в глиняном грунте). Это объясняется изменением во времени как температурных условий откачки тепла из грунта, так и потребности в теплоте. Следовательно, мощность ТН может быть фактором оптимизации Q_o .

На величину Q_o влияет количество активных зондов. Для примера, как видно на рис. 1, при переходе от 5 активных зондов к 9 наблюдается рост Q_o почти в 3 раза. Исходя из этого, влияние количества зондов на эффективность процесса при закачке тепла в ГА [5] и откачке различно. Очевидно, что структура куста должна быть девятизондовой, но при закачке тепла в целях экономии энергии на привод насосов крайние 4 зонда могут быть отключены в соответствии с [5].

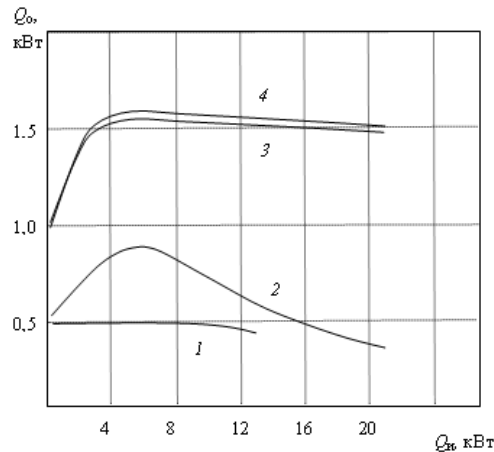


Рисунок 1 – Зависимость расчетной отопительной нагрузки потребителя от расчетной тепловой мощности испарителя теплового насоса с зондами глубиной 10 м в глиняном грунте. Шаг расположения зондов (м) и их активированное количество: 1 – 4/5; 2 – 6/5; 3 – 4/9; 4 – 6/9

Общей тенденцией при разных условиях, как видно из рис. 1, является экстремальный характер рассматриваемых зависимостей. Наибольшие значения функции Q_o достигаются при тепловой мощности испарителя Q_n близкой к 5 кВт. Примечательно, что это же значение тепловой мощности испарителя, которое можно назвать оптимальным - Q_n^{opt} , характерно и для работы зондов в других видах грунта: известняковом, песчаном. Оптимальной Q_n^{opt} отвечает и наибольшее, оптимальное, значение расчетной отопительной нагрузки - Q_o^{opt} .

Следует отметить, что сезонные затраты электроэнергии на привод ТН также изменяются в зависимости от мощности испарителя. Эта зависимость, так же, как и для отопительной нагрузки, имеет экстремальный характер, который устойчиво отвечает Q_n^{opt} при различных значениях шага куста и количестве активированных зондов.

На рис. 2 показана зависимость оптимальной расчетной отопительной нагрузки потребителя при фиксированной расчетной мощности испарителя, найденной как $Q_n^{opt} = 5$ кВт, от конструктивных факторов куста, а также от вида грунта. Как видно, шаг расположения зондов в кусте существенно влияет на рассматриваемую функцию. Увеличение шага приводит к росту Q_n^{opt} . Причем малые значения шага, до 2 м, оказываются непригодными для работы ГА. Значение шага куста, отвечающее наибольшему значению Q_n^{opt} , зависит от количества активированных зондов и теплофизических свойств грунта. Учитывая, как это следует из рис. 2, что наилучшие условия работы куста в процессе охлаждения имеют место при всех активированных зондах (9 единиц), можно найти оптимальный шаг S при наибольшем значении Q_n^{opt} : для песка – 4 м; для глины – 5 ... 5,5 м; для известняка – 6...6,5 м.

Анализ зависимости оптимальной расчетной мощности ТН по испарителю от вида грунта и глубины зонда при вариантном шаге зондов, определяемым в соответствии с проведенной оптимизацией, показал, что для зондов небольшой глубины (10 м) Q_n^{opt} практически не зависит от свойств грунта. При этом определяющей характеристикой свойств грунта является его температуропроводность - $a_{гр}$. С увеличением глубины h зависимость от $a_{гр}$ возрастает. Для оценки Q_n^{opt} может быть использовано обобщающее соотношение в области определяющих параметров $h = 10...49$ м, $a_{гр} = (2,78...9,61) \cdot 10^{-7}$ м²/с в виде, кВт

$$Q_n^{opt} = 7,0023 - 0,1842 \cdot h + a_{гр} (5,83 \cdot h - 56,34) \cdot 10^5.$$

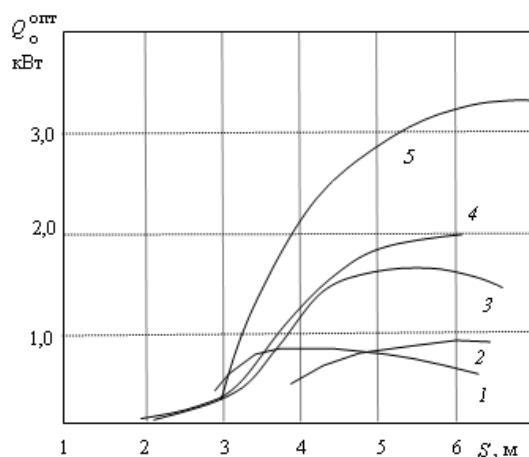


Рисунок 2 – Зависимость оптимальной расчетной отопительной нагрузки потребителя (при $Q_{н} = 5$ кВт) для зондов глубиной $h=10$ м от их шага, вида грунта, количества активированных зондов: 1 – песок, 9 зондов; 2 – глина, 5; 3 – глина, 9; 4 – известняк, 5; 5 – известняк, 9

Анализ зависимости оптимальной отопительной нагрузки потребителя от вида грунта и глубины зонда показывает, что Q_0^{opt} в большей степени зависит от свойств грунта, чем Q_0^{opt} . Здесь при небольшой глубине зонда уже проявляется влияние температуропроводности грунта. С увеличением глубины зонда это влияние возрастает.

Обобщающее соотношение для оценки такой зависимости получено в виде, кВт

$$Q_0^{opt} = 2,27 \cdot 10^6 a_{гп} \exp(0,043 \cdot h) - 0,24 \exp(0,0403 \cdot h) .$$

Шаг зондов здесь также варьируется, как и в предыдущем случае. Область определяющих параметров $h = 10 \dots 49$ м, $a_{гп} = (2,78 \dots 9,61) 10^{-7}$ м²/с.

Выводы. При кустовом способе организации сезонного аккумулятора наименьшей по количеству зондов эффективной структурой является девятизондовая, с шагом, зависящим от свойств грунта и высоты зонда. Предложены обобщающие зависимости, позволяющие по условию рационального режима работы системы теплоснабжения с геотермальными коллекторами в круглогодичном режиме определять расчетную отопительную нагрузку потребителя, производительность теплового насоса и размеры грунтового аккумулятора.

Список использованной литературы

1. *Высочин, В.В.* Роль грунтового теплообменника в сглаживании неравномерности работы геосистемы / В.В.Высочин, А.Ю.Громовой // Праці Одеського політехнічного університету. – Одеса, 2013. – Вип. 2(41). – С.148 – 152.
2. *Накорчевский, А.И.* Оптимальная конструкция грунтовых теплообменников / А.И.Накорчевский, Б.И.Басок // Промышленная теплотехника. – 2005. – Т.27, № 6. – С.27 – 31.
3. *Накорчевский, А.И.* Рациональные решения в теплогенерирующей системе «грунтовой массив - тепловой насос» / А.И.Накорчевский // Промышленная теплотехника. – 2007. – Т.29, № 4. – С.77 – 82.
4. *Трофименко, А.В.* Экспериментальные исследования рабочих режимов грунтового аккумулятора в системе теплоснабжения дома / А.В. Трофименко, А.А.Дмитренко, Д.П.Лапко, М.А.Назаренко // Промышленная теплотехника. – 2010. – Т.32, № 5. – С.67 – 71.
5. *Wysochin V.V.* Structural factors of solar system cluster ground coupled storage rationalization / V.V. Wysochin // Odes'kyi Politechnichnyi Universytet. Pratsi – Odessa, 2015. – Issue 3(47). – P.47 – 51.

V. Wysochin, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof.
Odessa National Polytechnic University

**FACTORS OF A CHOICE OF HEATING LOADING OF A SOLAR PLANT SYSTEM
WITH THE SOIL ACCUMULATOR OF HEAT**

Numerical researches of non-stationary processes of heat exchange in solar plant system with the thermal pump and the seasonal accumulator of heat with 9 soil vertical heat exchangers in the course of periodic, with a daily cycle, charges during the summer period and discharges in the winter are conducted. The mathematical model includes the equations describing conditions of arrival and transformation of solar energy in heliocollectors, heat exchange in soil heat exchangers in a three-dimensional file of a ground and processes in the thermal pump. Necessity of the account of mutual influence of the soil heat exchanger and the thermal pump, and also - possibility of increase of efficiency of the accumulator by a choice of a rational step of a bush and quantity of active heat ex-changers in the set structure is shown. Recommendations for choice settlement heating loading and the organisation of work of the thermal pump under condition of full maintenance of the consumer of heat during all winter period are offered.

Keywords: seasonal accumulator, solar plant system, thermal pump.

References

1. Wysochin, V.V. Role of the soil heat exchanger in smoothing of non-uniformity of work solar plant system / V.V.Wysochin, A.J.Gromovoj // Praci Odessjkiego politechnicznego universiteta. – Odessa, 2013. – Vyp. 2 (41). – S. 148–152. (Rus).
2. Nakorchevsky, A.I. Optimum design of soil heat exchangers / A.I. Nakorchevsky, B.I. Basok // Promyshlennaja teplotehnika. – 2005. – T. 27. –№ 6. - S. 27– 85. (Rus).
3. Nakorchevsky, A.I. Rational decisions in heat generating system «soil array - the thermal pump»// A.I. Nakorchevsky // Promyshlennaja teplotehnika. – 2007. – T. 29. –№ 4. - S. 77– 82. (Rus).
4. Trofimenko, A.V. Experimental researches of operating conditions of the soil accumulator in system of a heat supply of the house /A.V.Trofimenko, A/A/Dmitrenko, D.P.Lapko, M.A.Nazarenko// Promyshlennaja teplotehnika. – 2010. – T. 32. –№ 5. - S. 67– 71. (Rus).
5. Wysochin V.V. Strucural factors of solar system cluster ground coupled storage rationalization / V.V. Wysochin //Odes'kyi Politechnichniy Universytet. Pratsi – Odessa, 2015. – Issue 3(47). – S.47 – 51. (Eng).

УДК 662.997+697.7

В.В. Височин, канд. техн. наук, доц.

**Одеський національний політехнічний університет
ІНФОРМАЦІЙНІ АСПЕКТИ ВПРОВАДЖЕННЯ СИСТЕМ КОНТРОЛЮ ТА ПЛАНУВАННЯ
ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ НА КОТЕЛЬНИХ ЦСТ**

Проведено чисельні дослідження нестационарних процесів теплообміну в геліосистемі з тепловим насосом і сезонним акумулятором тепла з 9 ґрунтовими вертикальними теплообмінниками в процесі періодичної, з добовим циклом, зарядки в літній період і розрядки в зимовий. Математична модель включає рівняння, що описують умови приходу й перетворення сонячної енергії в геліоколекторі, теплообмін у ґрунтових теплообмінниках у тривимірному масиві ґрунту й процеси в тепловому насосі. Показано необхідність урахування взаємного впливу ґрунтового теплообмінника й теплового насоса, а також - можливість підвищення ефективності акумулятора шляхом вибору раціонального кроку куца й кількості активних теплообмінників у заданій структурі. Запропоновано рекомендації з вибору розрахункового опалювального навантаження й організації роботи теплового насоса за умови повного забезпечення споживача тепла усього зимового періоду.

Ключові слова: сезонний акумулятор, геліосистема, теплової насос.

Надійшла 16.05.2017
Received 16.05.2017

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) – **кегель 14**.
- Заголовки елементів основного тексту (Вступ, Мета та завдання тощо) виділяються напівжирним шрифтом (Ж).

3) **Структура статті:**

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

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

Основний текст статті

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

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

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

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

Крапки після назви структурних частин статті не ставити.

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

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

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

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

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

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

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

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

Англійська анотація за обсягом рекомендується більшою за українську (російську) 1700-к2000 знаків, оскільки для закордонних вчених анотація є, як правило, єдиним джерелом інформації про зміст статті.

У разі відсутності або низького рівня перекладу 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