

АНАЛІЗ НЕОДНОРІДНОСТІ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ З ВІДНОВЛЮВАНИМИ ДЖЕРЕЛАМИ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ

Отримано 12 січ. 2025 р.; рекомендовано до публікації 27 черв. 2025 р.
Доступно онлайн 30 черв. 2025 р.

Кирик В. В.

Автор для кореспонденції: Кирик Валерій,
e-mail: vkyryk@ukr.net

д-р техн. наук

<https://orcid.org/0000-0003-0419-8934>

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

У статті описано неоднорідності електричних мереж, які можуть бути викликані інтеграцією в електроенергетичну систему відновлюваних джерел електричної енергії. Виконана оцінка нових викликів та проблем, пов'язаних з цим процесом. Відзначається, що вирішення проблем в процесі інтеграції відновлюваних джерел енергії в електроенергетичну систему, пов'язано з подоланням неоднорідності електричних мереж, яка суттєво впливає на режимні параметри. Для забезпечення стійкості функціонування енергосистеми необхідне виконання багатофакторного аналізу й оцінки впливу впровадження відновлюваної генерації як з технічної, так і з технологічної, інноваційної та політичної сторін. Установлено, що до основних неоднорідностей електричних мереж з відновлюваними джерелами можна віднести географічну, експлуатаційну, структурну, функціональну і часову неоднорідності. Кожна з них має вплив на ефективність і надійність електропостачання. Запропоновано шляхи та інструменти подолання різного типу неоднорідностей в електричних мережах. Акцентовано, що вагомий внесок у нівелювання неоднорідності має забезпечити впровадження технологій інтелектуальних мереж, які на основі використання даних у реальному часі та передової аналітики гарантуватимуть оптимальну диспетчеризацію енергії на всіх рівнях номінальної напруги, особливо на рівні середньої та низької напруги розподілених енергетичних ресурсів і мікромереж.

Ключові слова: неоднорідність, електричні мережі, відновлювальні джерела енергії, інверторні ресурси.

ANALYSIS OF HETEROGENEITY OF ELECTRICAL NETWORKS WITH RENEWABLE SOURCES OF ELECTRICAL ENERGY

Received Jan. 17, 2024; accepted Jun. 27, 2025
Available online Jun. 30, 2025

Kyryk V.

Author for correspondence: Kyryk Valerii,
e-mail: vkyryk@ukr.net

Dr. of Science (Eng.), Professor

<https://orcid.org/0000-0003-0419-8934>

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

The article describes possible heterogeneities of electrical networks that may be caused by the integration of renewable energy sources into the power system. An assessment of new challenges and problems associated with this process is made. It is noted that solving problems in the process of integrating renewable energy sources into the power system is associated with overcoming the heterogeneity of electrical networks, which significantly affects the operating parameters. To ensure the stability of the power system, it is necessary to perform a multifactor analysis and assess the impact of the introduction of renewable generation from both technical and technological, innovative and political sides. It has been established that the main heterogeneities of electrical networks with renewable sources include geographical, operational, structural, functional and temporal heterogeneity. Each of the heterogeneities has an impact on the efficiency and reliability of power supply. Ways and tools for overcoming various types of heterogeneity in electrical networks are proposed. It is emphasized that a significant contribution to leveling heterogeneity should be provided by smart grid technologies, which, based on the use of real-time data and advanced analytics, will ensure optimal energy dispatching at all nominal voltage levels, especially at the medium and low voltage levels of distributed energy resources and microgrids.

Keywords: *heterogeneity, electrical networks, renewable energy sources, inverter-based resources.*

Використані позначення та скорочення

ВДЕ – відновлювані джерела енергії

ЕЕС – електроенергетична система

IBR – Inverter-Based Resource

РПН – регулювання під навантаженням

FACTS – Flexible Alternative Current

ESS – Energy Storage Systems

Transmission Systems

DER – Distributed energy resources

Вступ. Сучасний розвиток електроустаткування, технологій та інноваційних стратегій спонукає до широкого проникнення відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) в електричні мережі. Урядами промислово розвинених країн створюються сприятливі політичні умови й ринкові стимули для сприяння впровадженню технологій відновлюваної енергії.

Інтеграція в електричні мережі відновлюваних джерел електричної енергії з використанням різноманітних первинних ресурсів [1] створює унікальні різносторонні проблеми в електроенергетичній системі (ЕЕС), які пов'язані з динамічним перерозподілом потоків потужності, збільшенням втрат активної потужності та ускладненням роботи з управління електромережею. Ці проблеми стають особливо актуальними при підвищенні рівня проникнення відновлюваної енергетики (до десятків відсотків) в електричні мережі, коли в класичній енергосистемі із синхронними генераторами різко зростає кількість інверторних генераторів (IBR – Inverter-Based Resource), що призводить до відносного зменшення в системі механічної «синхронної маси», тобто до різних змін співвідношень коефіцієнтів інерції та демпфування. Таким чином суттєво змінюється парадигма класичних енергосистем у бік інверторної системи з появою нових проблем.

Однією з проблем, пов'язаних з ВДЕ, є неоднорідність електричних мереж, яка суттєво впливає на режимні параметри, стійкість функціонування системи й потребує багатофакторного аналізу й оцінки впливу впровадження відновлюваної генерації як з технічної, так і з технологічної, інноваційної та політичної сторін. У міру того, як IBR дедалі більше впроваджуються в систему, мережа за своєю суттю стає більш неоднорідною. Тому актуальним стає питання неоднорідності, що присутня в електромережі, коли вона переходить від домінування синхронних генераторів до домінування інверторної генерації. Значна неоднорідність мережі своєю чергою призводить до проблем синхронізації енерговузлів.

Постановка завдання. Мета роботи – виявлення основних типів неоднорідностей електричних мереж, які викликані інтеграцією в електроенергетичну систему відновлюваних джерел електричної енергії, і оцінка нових викликів та проблем, пов'язаних з цим процесом.

Виклад основного матеріалу. Неоднорідність електричних мереж з відновлюваними джерелами можна розподілити на кілька типів: географічна, експлуатаційна, структурна, функціональна і часова. Кожна з неоднорід-

ностей має вплив на ефективність і надійність як ЕЕС в цілому, так і систем відновлюваних джерел енергії зокрема [2].

Географічна неоднорідність пов'язана з гетерогенністю, тобто з нерівномірним територіальним розподілом відновлюваних ресурсів, таких як енергія Сонця та вітру відносно споживачів. Різні регіони можуть мати різний доступ до цих видів енергії, що впливає на місцеву генерувальну потужність та її синхронізацію з мережею. Цей аспект вимагає ретельного планування та управління для оптимізації енергії потоку та підтримки стабільності мережі в різних географічних зонах. Важливим питанням, пов'язаним з географічною неоднорідністю, є визначення мережевих топологічних особливостей: кластерів генерації та споживання, їх топологічних розмірів та сили зв'язків регіонів з різним співвідношенням коефіцієнтів інерції й демпфування [3, 4]. Важливими аспектами географічної неоднорідності є обмеження землекористування, екологічні питання та урбанізація економічного розвитку.

Експлуатаційна неоднорідність охоплює нормативні вимоги використання електрообладнання і різних джерел енергії, включно зі змінами в технології обслуговування, часом реагування на аварійні події в мережі. Різні нормативні документи щодо експлуатації ВДЕ можуть вплинути на взаємодію електрообладнання в мережі [5, 6]. Зменшення рівня експлуатаційної неоднорідності пов'язано з удосконаленням технологій експлуатації мережі на основі використання сучасних швидкодіючих інтелектуальних цифрових датчиків з розширеними можливостями, інноваційних систем автоматизації та аналізу даних у реальному часі, які сприяють ефективному функціонуванню електрообладнання. Сучасне електрообладнання і методи силової електроніки є потенційною заміною традиційних рішень, які зазвичай засновані на електромеханічних технологіях, що мають низький час відгуку і високі витрати на технічне обслуговування. Сучасні інноваційні технології обслуговування мережі забезпечать кращий зв'язок традиційних компонентів з відновлюваними джерелами енергії.

Структурна неоднорідність полягає в топології сучасних енергосистем, тобто відображає різноманітність конфігурацій електромереж за наявності джерел електроенергії різної природи, як класичних, так і ВДЕ, тобто відтворює поєднання синхронних і інверторних ресурсів (IBR). Структура традиційних електричних мереж була розроблена для сталого постачання енергії від централізованих джерел генерації, що робить їх на сьогодні не

повною мірою пристосованими для роботи зі змінною природою генерування електричної енергії. Структура має багато різновидів, які є результатом спадщини економічних, політичних, інженерних та екологічних рішень. Станом на сьогодні електроенергетична система України складається з чотирьох територіальних управлінь: Північного, Західного, Східного та Південного [7–10]. В умовах катастрофічних впливів на систему та пов'язаних з цим відключень синхронної генерації, тобто зміни структури, зменшується інерційність системи, що призводить до ще більшого загострення проблеми стабільності частоти й напруги, а в цілому – до критичного рівня «живучості» системи.

Функціональна неоднорідність представляється різноманітними робочими можливостями взаємодії синхронних і несинхронних (інверторних) джерел електроенергії в посередництві ліній електропередавання, трансформаторів та систем компенсації і залежить від співвідношення реактивного X та активного R опорів ділянок мережі [11]. Потоки потужності по мережі значною мірою розподіляються залежно від імпедансу ділянок мережі. Лінія електропередавання з низьким опором дозволяє пропускати через неї більшу потужність, ніж лінія з високим опором. Це не завжди найбажаніший результат, тому що досить часто він призводить до низки проблем. Функціональна неоднорідність електричних систем спричиняє збільшення втрат електроенергії під час її транспортування. Мережа вважається однорідною, коли на ділянках мережі дотримується співвідношення

$$\frac{x_i}{r_i} = \frac{X}{R} = \text{const}, \quad i = 1, 2, \dots, n - \text{ділянки мережі.}$$

Окрім різноманітності параметрів джерел генерації необхідно враховувати, що однаковість перерізів проводів не є підставою вважати мережу однорідною. Мережа, в якій одну ділянку виконано кабелем, а другу – повітряною лінією, за однакових значень перерізів жил і проводів не буде однорідною, оскільки має різні співвідношення реактивних погонних опорів. Неоднорідною буде повітряна лінія електропередавання з однаковим перерізом проводів, але з різною середньогометричною відстанню між проводами на окремих ділянках. Ділянку мережі можна штучно звести до однорідної послідовним включенням у фази конденсаторів на окремих ділянках так, щоб відношення реактивного та активного опорів було однаковим на всіх ділянках. Також для зменшення неоднорідності мережі необхідно використовувати однотипні трансформатори, оснащені автоматичним регулятором напруги РПН, передбачати установку пристроїв повздовжньої та поперечної компенсації реактивної потужності й пристроїв повздовжньо-поперечного керування потоками потужності [12, 13]. Істотному зменшенню функціональної неоднорідності сприяє впровадження сучасних пристроїв гнучкого управління перетіканнями реактивної та активної потужності і регулюванням напруги на високовольтних лініях змінного струму як за значенням, так і за фазовим кутом (FACTS).

Сучасні пристрої FACTS мають можливість регулювати передавання активної та реактивної потужності в електричних мережах, вирішуючи широкий клас задач з підвищення надійності й стійкості роботи систем з різними джерелами електроенергії разом із забезпеченням належної якості електропостачання.

Часова неоднорідність відображає мінливість відновлюваної генерації та навантаження за часом, що потребує передових стратегій управління для забезпечення статичної та динамічної стійкості електричної системи. Виробництво енергії Сонця та вітру дуже залежить від погодних умов, що призводять до коливань виробництва електроенергії [1, 14]. Коливання потужності з відновлюваних джерел можуть досягати 70 % для сонячної електроенергії, і 100 % – для вітру, що набагато більше, ніж мінливість попиту. Тобто відновлювані джерела енергії за своєю суттю є переривчастими, схильними до коливань в електропостачанні, які можуть створити проблеми для стабільності мережі [4]. Мінливість генерованої потужності відновлюваних джерел енергії може негативно вплинути як на стабільність мережі, так і на якість електроенергії. Коливання генерації можуть призвести до проблем з режимними параметрами, зокрема напругою й частотою, які є вирішальними для підтримки безперебійного електропостачання. У цьому аспекті інтеграція систем накопичення енергії (Energy Storage Systems – ESS) є важливою запорукою для пом'якшення цих тимчасових коливань потужності, що забезпечує більш плавну подачу енергії та підвищену надійність електропостачання відновлюваними джерелами електроенергії.

Зі збільшенням у системі частки ресурсів на основі інверторів завдання регулювання частоти в мережі стає дедалі складнішим. У сучасних реаліях енергосистеми мінливість попиту балансується процесом комутації джерел резервної генерації. Традиційним моделями регулювання, сконцентрованими на синхронних генераторах, все складніше забезпечувати регулювання, і ця обставина вимагає нових підходів та створення моделей регулювання частоти й напруги за новою парадигмою технологій відновлюваних джерел. Ефективність моделей управління системою в подальшому буде залежати від розробки інтелектуальних методів прогнозування та новітніх системи зберігання енергії, які дадуть змогу підвищити якість і надійність електропостачання пом'якшенням мінливості процесу генерування електроенергії.

Вагомий внесок у нівелювання неоднорідності електричних систем повинні забезпечити технології інтелектуальних мереж. Впровадження розумних мереж (Smart Grid) з використанням даних в реальному часі та передової аналітики відкриває нові можливості диспетчеризації енергії на всіх рівнях номінальної напруги, особливо на рівні середньої та низької напруги розподілених енергетичних ресурсів (DER) і мікромереж. Розумна мережа самостійно має відстежувати й розподіляти потоки електроенергії для досягнення максимальної

ефективності використання як традиційних, так і інверторних енергетичних ресурсів. Smart Grid має забезпечити двосторонній потік електричної енергії та інформації між електричними станціями й споживачами за рахунок застосування новітніх технологій, інструментів і методів, які наповнюють електроенергетику «знаннями», тобто елементами штучного інтелекту, які в цілому дають змогу різко підвищити ефективність функціонування електроенергетичної системи [15]. Необхідно відмітити і важливість впливу на зменшення неоднорідності в електроенергетичній системі впровадження сучасних методів моніторингу та контролю в реальному часі, які дозволяють виконувати динамічні коригування у відповідь на зміну умов функціонування, в такий спосіб підвищуючи продуктивність електричних мереж.

Важливим інструментом поступової адаптації ВДЕ в систему зі зменшенням неоднорідності є ринкові механізми збалансування ефективності та управління ризиками з необхідністю моделювання попиту та пропозиції й оптимізація використання відновлюваної енергії [16]. Світовий досвід свідчить, що в динамічних реакціях на попит за дії ринкових механізмів відновлюваних ресурсів існує важливий компроміс між загальносистемною ефективністю та ризиком збільшення загальної вартості надійного постачання електроенергії. Впровадження розрахункових цін у режимі реального часу та стратегії динамічного ціноутворення можуть полегшити зміни в моделях попиту та пропозиції.

Запровадження «зелених» тарифів і стандартів поновлюваного портфеля в різних юрисдикціях на національному рівні підтверджують свою ефективність стимулювання проектів у сфері відновлюваної енергетики, що зрештою приведе до збільшення інтеграції ВДЕ в систему й своєю чергою спонукатиме до знаходження рішень проблемних питань з неоднорідністю електричних мереж.

Висновки. Електроенергетичні системи як в Україні, так і в усьому світі зазнають глибокого перетворення. Одним із чинників цього перетворення є інтеграція в енергосистеми відновлюваних джерел електроенергії, які суттєво змінюють неоднорідність електричних мереж та призводять до появи нових викликів та унікальних проблем.

Зі збільшенням у системі частки інверторних ресурсів змінюється традиційна динаміка виробництва електроенергії та функціонування мережі, що вимагає переоцінки процесів координації між операторами системи передачі та розподілу.

Вирішення проблем, викликаних неоднорідністю електроенергетичних систем, що пов'язані з відновлюваною генерацією, вимагає скоординованих зусиль науковців і політиків у напрямі вдосконалення нормативно-правової бази та розроблення комплексних стратегій інтегрування ВДЕ в енергосистему із залученням ринкових стимулів.

На сьогодні, попри певні успіхи впровадження відновлюваних джерел генерації в ОЕС України, залишається низка проблем стосовно відновлюваних джерел енергії. Існуюча мережева інфраструктура, розроблена для централізованого виробництва електричної енергії, потребує значних модернізацій особливо щодо структурної, експлуатаційної та функціональної неоднорідностей. Оптимальним рішенням для зменшення часової неоднорідності є впровадження гібридних системи інверторної генерації, які поєднують різні технології відновлюваних джерел енергії з накопиченням та зберіганням електричної енергії.

Для ефективного використання відновлюваних джерел електроенергії в ОЕС України важливо як модернізувати розподільні мережі, з переведенням їх на вищий клас номінальної напруги, так і розширювати міжсистемні магістральні мережі та міждержавні зв'язки на різних рівнях комунікації – технічному, технологічному, науковому та політичному. Впровадження світових інноваційних енергетичних рішень з об'єднанням знань, технологій та ресурсів дасть змогу вирішувати національні й світові проблеми інтеграції відновлюваних джерел енергії та в цілому підвищити стійкість і «живучість» електричних систем.

ПОСИЛАННЯ

1. Відновлювані джерела енергії / За ред. С. О. Кудрі. К.: Інститут відновлюваної енергетики НАНУ, 2020. 392 с.
2. Rick Wallace Kenyon, Matthew Bossart, Marija Markovic, Kate Doubleday, Reiko Matsuda-Dunn, Stefania Mitova, Simon A. Julien, Elaine T. Hale, and Bri-Mathias Hodge. Stability and control of power systems with high penetrations of inverter-based resources: An accessible review of current knowledge and open questions. *Solar Energy*, 210:149–168, 2020. Special Issue on Grid Integration. URL: <https://arxiv.org/html/2404.06374v1>
3. Bálint Hartmann, Géza Ódor, István Papp, Kristóf Benedek, Shengfeng Deng, and Jeffrey Kelling. Dynamical heterogeneity and universality of power-grids. URL: <https://arxiv.org/pdf/2308.15326>
4. Mark Walth, Amir Sajadi, Bri-Mathias Hodge. Synchronization in Modern Heterogeneous Power Networks with Inverter-Based Resources. URL: <https://arxiv.org/pdf/2404.06374v1>
5. СОУ НЕК 341.001:2019 Вимоги до вітрових та сонячних електростанцій при їх роботі паралельно з об'єднаною енергетичною системою України. НПЦР ОЕС України, 2019. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=82648

6. Правила улаштування електроустановок. Видання офіційне. Міненерговугілля України. К.: Вид-во «Форт», 2017. 760 с.
7. Кодекс системи передачі. Затверджено Постановою НКРЕКП № 309 від 14.03.2018. 201 с.
8. Stout S., Lee N., Cox S., Elsworth J., Leisch J. Power sector resilience planning guidebook. U.S. Department of Energy's NREL and USAID. 2019. 82 p. URL: <https://www.nrel.gov/docs/fy19osti/73489.pdf>
9. Stirling A. From Sustainability, through Diversity to Transformation: towards more reflexive governance of technological vulnerability. Vulnerability in Technological Cultures: new directions in research and governance. MIT Press, 2014. Pp. 305–332. URL: https://www.researchgate.net/publication/280154060_From_Sustainability_through_Diversity_to_Transformation_towards_more_reflexive_governance_of_technological_vulnerability
10. Саух С. Є. Концепція побудови структурно мінливої електроенергетичної системи України. Технічна електродинаміка. 2023. № 4. С. 112–118.
11. Холмський В. Г. Розрахунок та оптимізація режимів електричних мереж / В. Г. Холмський. К.: Вища школа, 1975. 280 с.
12. Лежнюк П. Д. Компенсація взаємовпливу неоднорідних електричних мереж з використанням лінійних регуляторів : монографія / П. Д. Лежнюк, О. Є. Рубаненко, А. В. Килимчук. Вінниця: ВНТУ, 2017. 172 с.
13. Оптимальне керування потоками потужності і напругою в неоднорідних електричних мережах / П. Д. Лежнюк, В. В. Кулик. Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2003. 188 с.
14. Кузнецов М. П. Моделирование параметров работы энергосистемы, які носять випадковий характер. Відновлювана енергетика. 2012. № 3. С. 5–9.
15. Кирик В. В. Математичний апарат штучного інтелекту в електроенергетичних системах: підручник / В. В. Кирик. К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка» 2019. 224 с.
16. Ian Schneider. Mardavij Roozbehani Energy Market Design for Renewable Resources: Imbalance Settlements and Efficiency–Robustness Tradeoffs / IEEE Transactions on Power Systems (Volume 33. Issue 4, July 2018). Pp. 3757–3767. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8186253>
17. Mitova, Simon A. Julien, Elaine T. Hale, and Bri-Mathias Hodge. Stability and control of power systems with high penetrations of inverter-based resources: An accessible review of current knowledge and open questions. Solar Energy, 210:149–168, 2020. Special Issue on Grid Integration. URL: <https://arxiv.org/html/2404.06374v1>
18. Bálint Hartmann, Géza Ódor, István Papp, Kristóf Benedek, Shengfeng Deng, and Jeffrey Kelling. Dynamical heterogeneity and universality of power-grids. URL: <https://arxiv.org/pdf/2308.15326>
19. Mark Walth, Amir Sajadi, Bri-Mathias Hodge. Synchronization in Modern Heterogeneous Power Networks with Inverter-Based Resources. URL: <https://arxiv.org/pdf/2404.06374v1>
20. SOU NEK 341.001:2019 Vymogy do vitrovykh ta sonyachnykh elektrostanciy pry yikh roboti paralelno z obednanoyu energetychnoyu systemoyu Ukrayiny. NPTsP OES Ukrayiny, 2019. (Ukr.) [Requirements for wind and solar power plants when operating in parallel with the unified energy system of Ukraine] URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=82648
21. Pravyla ulashtuvania elektroustanovok. Vydaniya ofitsiyne. Minenerhovugilia Ukrayiny. Kyiv: Vydavnytstvo "Fort", 2017. 760 s. (Ukr.) [Rules for installing electrical installations]
22. Kodeks systemy peredachi. Satverdzheno Postanovoyu NKREKP № 309 vid 14.03.2018. 201 s. (Ukr.) [Transmission System Code]
23. Stout S., Lee N., Cox S., Elsworth J., Leisch J. Power sector resilience planning guidebook. U.S. Department of Energy's NREL and USAID. 2019. 82 p. URL: <https://www.nrel.gov/docs/fy19osti/73489.pdf>
24. Stirling A. From Sustainability, through Diversity to Transformation: towards more reflexive governance of technological vulnerability. Vulnerability in Technological Cultures: new directions in research and governance. MIT Press, 2014. Pp. 305–332. URL: https://www.researchgate.net/publication/280154060_From_Sustainability_through_Diversity_to_Transformation_towards_more_reflexive_governance_of_technological_vulnerability
25. Saukh S. E. Kontseptsia pobudovy strukturno minlyvoi energetychnoi systemy Ukrainy / Tekhichna elektrodynamika. 2023. № 4. S. 112–118. (Ukr.) [Concept of building a structurally variable power system of Ukraine]
26. V. Kholmiskiy. Rozrakhunok ta optymisaciya rezhymiv elektrychnykh merezh / V. G. Kholmiskiy. K.: Vbshcha shkola, 1975. 280 s. (Ukr.) [Calculation and optimization of electrical network modes]
27. P. Lezhniuk. Kompensatsiya vsayemovplyvu neodnorodnykh elektrychnykh merezh z vykorystanyam liniynykh reguliatoriv: monografiya / P. D. Lezhniuk, O. Ye. Rubanenko,

REFERENCES

1. Vidnovliuvani dzhherela enerhii / Za red. S. O. Kudri. K.: Instytut vidnovliuvanoi enerhetyky NANU. 2020. 392 s. (Ukr.) [Renewable energy sources (monograph)]
2. Rick Wallace Kenyon, Matthew Bossart, Marija Markovic, Kate Doubleday, Reiko Matsuda-Dunn, Stefania

- A. V. Kylymchuk. Vinnytsya: VNTU, 2017. 172 s. (Ukr) [Compensation of the mutual influence of heterogeneous electrical networks using linear regulators]
13. P. Lezhniuk. Optymalne keruvannya potokamy potuzhosti I napruhoyu / P. D. Lezhniuk, V. V. Kulyk. Vinnytsya: UNIVERSUM-Vinnytsya, 2003. 188 s. (Ukr) [Optimal control of power and voltage flows in heterogeneous electrical networks]
14. M. Kuznietsov. Modeluvannya parametriv roboty energosystem, yaki nosyat vypadkovyy kharakter. Vidnovluvana enerhetyka. 2012. № 3. S. 5–9. (Ukr) [Modeling of power system operation parameters that are random in nature]
15. V. Kyryk. Matematychnyy aparat shtuchnogo intelektu v elektroenergetychnykh systemakh: pidruchnyk / V. V. Kyryk. Kyiv: KPI im. Ihoria Cikors'koho, Vyd-vo "Politehnika" 2019. 224 s. (Ukr) [Mathematical apparatus of artificial intelligence in electric power systems]
16. Ian Schneider. Mardavij Roozbehani Energy Market Design for Renewable Resources: Imbalance Settlements and Efficiency–Robustness Tradeoffs / IEEE Transactions on Power Systems (Volume 33. Issue: 4, July 2018). Pp. 3757–3767. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8186253>