

Вінницький національний технічний університет  
Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова праця  
на правах рукопису



**СІКОРСЬКА ОЛЕНА ВІКТОРІВНА**

УДК 621.316.13

**ДИСЕРТАЦІЯ**

**РОЗОСЕРЕДЖЕНЕ ГЕНЕРУВАННЯ В ЗАДАЧАХ ПІДВИЩЕННЯ  
ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ РОЗПОДІЛЬНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ**

05.14.02 – електричні станції, мережі і системи

Технічні науки

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук.

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,  
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

  
\_\_\_\_\_ О.В. Сікорська

Науковий керівник: Комар Вячеслав Олександрович, доктор технічних наук,  
доцент

Вінниця – 2021

## АНОТАЦІЯ

*Сікорська О.В.* Розосереджене генерування в задачах підвищення енергоефективності розподільних електричних мереж. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.14.02 «Електричні станції, мережі і системи». – Вінницький національний технічний університет, Вінниця, 2021.

Робота присвячена розв'язку задач по підвищенню рівня енергоефективності розподільних електричних мереж з розосередженими джерелами енергії. Підвищення економічності й якості енергетичного виробництва є складною комплексною проблемою, що вимагає для свого вирішення системного підходу. Однією зі складових цієї проблеми є розрахунок та аналіз впливу відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) на енергоефективність функціонування розподільних електричних мереж (РЕМ).

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовано мету та задачі дослідження, вказана наукова новизна та практична цінність отриманих результатів. Наведені відомості про апробацію роботи, особистий внесок здобувача і публікації. Зафіксовано зв'язок роботи з науковими програмами, темами.

У першому розділі розглядається проблема визначення та зниження негативного впливу ВДЕ на енергоефективність розподільних електричних мереж, а також проаналізовані найбільш ефективні електроощадні заходи для електричних мереж 10(6) кВ. Оскільки, в останні роки неконтрольоване зростання частки відновлюваних джерел в енергетичному балансі зумовила завантаження великої кількості розподільних ліній і трансформаторів, то це призводить не тільки до збільшення втрат електроенергії, а й зниження надійності електропостачання й якості електроенергії. Розв'язання цих задач

вимагає комплексного підходу, який включає проведення організаційних і технічних електроощадних заходів, а також розвиток і реконструкцію електричних мереж. Враховуючи взаємовплив всіх заходів і змін в ЕМ, корисно мати загальну оцінку впливу їх на ефективність функціонування електричної мережі в цілому. Доцільність такої оцінки пояснюється тим, що капіталовкладення, які, як правило, обмежені, необхідно розподіляти і вкладати найбільш ефективно. Тобто так, щоб зменшувалися втрати електроенергії, збільшувалася надійність електропостачання і покращувалася якість електроенергії.

У другому розділі розглянуто метод формування оптимального значення активної і реактивної потужностей ВДЕ та проведено моделювання технічних можливостей фотоелектричної станції у компенсуванні реактивної потужності в електричній мережі. Показано використання методів еквівалентування в задачах оцінювання впливу ВДЕ в електричних мережах нижчої напруги на параметри ЕЕС. Удосконалено метод визначення оптимального значення встановленої активної потужності ВДЕ, які під'єднані в вузлах схеми. Важливим є визначити її значення в контексті забезпечення параметрів мережі в межах, встановлених нормативними документами, а також участі ВДЕ в плануванні і підтримці балансу потужності та електроенергії в ЕЕС. Запропонований метод формування оптимального значення потужності ВДЕ пристосований до визначення значень їх потужності і характеру їх зміни, коли критерієм оптимальності є втрати електроенергії в мережі. Розроблений метод, що базується на аналізі чутливості втрат потужності в ЕМ дозволяє однозначно характеризувати можливість і доцільність використання ФЕС для компенсації реактивної потужності, як найбільш впливового заходу зі зменшення втрат для цього фрагменту електричних мереж за енергетичним критерієм.

Відсутність достатнього об'єму вихідної інформації для розрахунку режимів електричних мереж різних класів напруги енергопостачальної

компанії не дозволяє в повній мірі врахувати відновлювані джерела енергії. Тому в роботі виконано вдосконалення методу визначення взаємовпливу електричних мереж різних класів напруги, шляхом врахування режиму роботи відновлюваних джерел енергії в мережах нижчих класів напруги, через уточнення напрямків перетікання потужності та її значення в точці примикання до мереж вищих класів напруги.

Аналіз методів еквівалентування, проведений в роботі, показав необхідність їх вдосконалення для розв'язання поставленої задачі. Тому в роботі запропоновано використовувати натурно-імітаційне моделювання. Цей підхід дозволяє об'єднати як натурні, так і обчислювальні експерименти і отримати базу можливих режимів електричних мереж з відновлюваними джерелами енергії, на основі яких отримати узагальнюючі залежності величини і напрямку потужності в точці примикання до мережі вищих класів напруги в залежності від потужності, яка генерується ВДЕ в різних точках мережі нижчих класів напруги.

У третьому розділі показано можливість використання інтегрального показника якості функціонування для задач оцінювання рівня енергоефективності електричних мереж з ВДЕ, зокрема СЕС і малих ГЕС. Це дозволило сформулювати умови комплексного розв'язання поставленої задачі, яка включає в себе зменшення втрат електроенергії та покращення її якості, а також підвищення надійності, і розробити етапність впровадження заходів з підвищення ефективності функціонування електричних з ВДЕ.

Завдяки інтегруванню в одному показнику характеристик різних сторін функціонування електричних мереж спрощується оптимізація розвитку електричних мереж з врахуванням відновлюваних джерел енергії в них та реалізацію заходів з підвищення їх енергоефективності.

Оскільки потрібно не тільки притримуватися режимних критеріїв керування, а й прагнути до максимізації економічної ефективності функціонування системи, то цільова функція на основі інтегрального

показника якості функціонування повинна мати і економічну складову прибутків та компенсації в процесі передачі і розподілу електричної енергії. В процесі розбудови і експлуатації електричних мереж і відновлюваних джерел в них прагнуть до максимізації економічної ефективності функціонування локальної електричної системи, то цільова функція повинна містити економічні складові доходів і компенсацій в процесі передачі і розподілу електричної енергії.

Отриманий показник комплексно характеризує ефективність локальної електричної системи, зумовлену впровадженими заходами з підвищення енергоефективності, по відношенню до "ідеальної" системи.

Ефективність запропонованих методів показана на прикладі розрахунків максимальних та мінімальних режимів підстанції 110/35/10кВ за різних умов генерування СЕС і установки когенерації. При цьому запропонований підхід забезпечує контроль обмежень на параметри режиму електричної мережі в широкому діапазоні зміни генерування ВДЕ в ЛЕС. Враховується також перспектива розвитку навантаження в ЛЕС і закладається відповідно поетапне нарощування генерування.

У четвертому розділі подано результати практичних досліджень, метою яких є підтвердження ефективності розроблених методів та алгоритмів.

В розділі наводяться результати визначення оптимальної встановленої потужності ФЕС для схеми електричних мереж ТОВ «Вінницька птахофабрика» з врахуванням подальшого їх розвитку. Для цього за статистичними даними були визначені найімовірніші графіки навантаження та генерування фотоелектричних станцій. Зроблено моделювання режимів для запланованої потужності відновлюваних джерел та зроблені рекомендації відповідно до результатів отриманих запропонованим в роботі методом щодо оптимальної встановленої потужності для конкретних точок їх під'єднання до електричної мережі.

Відповідно до технічних можливостей ФЕС працювати в режимі

компенсатора реактивної потужності виконано моделювання такого режиму. Визначена ефективність використання ФЕС в режимі компенсатора за впливом на втрати активної потужності в електричній мережі.

Проведено моделювання можливих спотворень, які можуть генеруватись в режимі компенсатора.

Аналіз результатів моделювання дозволяє зробити висновок, що спотворення не перевищують допустимі величини. Однак спостерігається зростання непарних гармонік, особливо 5-ої. Крім цього необхідно пам'ятати про допущення прийняте під час моделювання про відсутність спотворень в електричній мережі без ФЕС, що не відповідає реальній ситуації в мережах 10 кВ України.

В роботі проаналізовані ряд заходів, які можна реалізувати шляхом оптимального розташування точок підключення ВДЕ, виведенням ФЕС в режим компенсатора реактивної потужності, тощо. Для цих заходів визначено значення показника ефективності.

*Ключові слова:* електричні мережі, розосереджені джерела енергії, втрати електроенергії, електроощадні заходи, показник якості функціонування, аналіз чутливості, енергоефективність.

## ABSTRACT

*Sikorska O.V.* Dispersed generation in the problems of increasing the energy efficiency of distribution electrical networks. - Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

A thesis submitted for the candidate degree in technical sciences on the speciality 05.14.02 "Electric power stations, networks and systems". – Vinnytsia National Technical University, Vinnytsya, 2021.

The work is devoted to solving problems of improving the energy efficiency of electrical distribution networks with dispersed energy sources. Improving the

efficiency and quality of energy production is a complex complex problem that requires a systematic approach. One of the components of this problem is the calculation and analysis of the impact of renewable energy sources (RES) on the energy efficiency of distribution electrical networks (DEN).

The introduction substantiates the relevance of the dissertation topic, formulates the purpose and objectives of the study, indicates the scientific novelty and practical value of the results. Information on approbation of work, personal contribution of the applicant and publication is given. The connection of work with scientific programs, topics is fixed.

The first section considers the problem of determining and reducing the negative impact of RES on the energy efficiency of electrical distribution networks, as well as analyzes the most effective electricity saving measures for 10 (6) kV electrical networks. Since in recent years the uncontrolled growth of the share of renewable sources in the energy balance has led to the loading of a large number of distribution lines and transformers, this leads not only to increased electricity losses, but also reduced reliability of electricity supply and electricity quality. Solving these problems requires a comprehensive approach, which includes organizational and technical energy-saving measures, as well as the development and reconstruction of electrical networks. Given the interaction of all measures and changes in energy network (EN), it is useful to have an overall assessment of their impact on the efficiency of the electrical network as a whole. The expediency of such an assessment is explained by the fact that investments, which are usually limited, must be distributed and invested most efficiently. That is, so as to reduce electricity losses, increase the reliability of electricity supply and improve the quality of electricity.

The second section considers the method of forming the optimal value of active and reactive RES power and simulates the technical capabilities of a photovoltaic plant in reactive power compensation in the electrical network. The use of equivalence methods in the problems of estimating the influence of RES in

low voltage electrical networks on the parameters of the power system is shown. The method of determining the optimal value of the installed active power of RES, which are connected in the nodes of the circuit, has been improved. It is important to determine its significance in the context of ensuring network parameters within the limits set by regulations, as well as the participation of RES in the planning and maintenance of the balance of capacity and electricity in the power system (PS). The proposed method of forming the optimal value of RES power is adapted to determine the values of their power and the nature of their change, when the criterion of optimality is the loss of electricity in the network. The developed method, based on the analysis of sensitivity of power losses in EN allows to unambiguously characterize the possibility and expediency of using photovoltaic station (PVS) to compensate reactive power as the most influential measure to reduce losses for this fragment of electrical networks by energy criterion.

The lack of sufficient source information to calculate the modes of electrical networks of different voltage classes of the energy supply company does not allow to fully take into account renewable energy sources. Therefore, the method of determining the interaction of electrical networks of different voltage classes is improved by taking into account the mode of operation of renewable energy sources in networks of lower voltage classes, by specifying the directions of power flow and its value at the point of connection to networks of higher voltage classes.

The analysis of equivalence methods carried out in this work showed the need to improve them to solve the problem. Therefore, the paper proposes to use full-scale simulation. This approach allows to combine both full-scale and computational experiments and to obtain a base of possible modes of electrical networks with renewable energy sources, based on which to obtain generalized dependences of magnitude and direction of power at the point of connection to the network of higher voltage classes depending on power generated. RES at different points of the network of lower voltage classes.

The third section shows the possibility of using an integrated performance



indicator for the tasks of assessing the level of energy efficiency of electrical networks with RES, in particular solar power plant (SPP) and small hydroelectric power plants (HPPs). This allowed to formulate the conditions for a comprehensive solution to the problem, which includes reducing electricity losses and improving its quality, as well as improving reliability, and to develop phased implementation of measures to improve the efficiency of electricity from RES.

Due to the integration in one indicator of the characteristics of different aspects of the functioning of electrical networks simplifies the optimization of the development of electrical networks taking into account renewable energy sources in them and the implementation of measures to improve their energy efficiency.

Since it is necessary not only to adhere to the regime control criteria, but also to strive to maximize the economic efficiency of the system, the target function based on the integrated performance indicator should have an economic component of profits and compensation in the transmission and distribution of electricity. In the process of development and operation of electrical networks and renewable sources in them seek to maximize the economic efficiency of the local electrical system, the target function should include the economic components of income and compensation in the transmission and distribution of electricity.

The obtained indicator comprehensively characterizes the efficiency of the local electrical system due to the implemented measures to improve energy efficiency in relation to the "ideal" system.

The efficiency of the proposed methods is shown by the example of calculations of maximum and minimum modes of 110/35/10 kV substation under different conditions of PVS generation and cogeneration unit. The proposed approach provides control of restrictions on the parameters of the electrical network in a wide range of changes in the generation of RES in the local power system (LPS). The prospect of load development in the LPS is also taken into account and a gradual increase in generation is laid down accordingly.

The fourth section presents the results of practical research, the purpose of

which is to confirm the effectiveness of the developed methods and algorithms.

The section presents the results of determining the optimal installed capacity of PVS for the scheme of electrical networks of LLC "Vinnytsia Poultry Farm" taking into account their further development. To do this, according to statistics, the most probable schedules of loading and generation of photovoltaic stations were determined. Models of modes for the planned capacity of renewable sources are made and recommendations are made in accordance with the results obtained by the method proposed in the work on the optimal installed capacity for specific points of their connection to the grid.

In accordance with the technical capabilities of the SPP to operate in the mode of reactive power compensator, the simulation of such mode is performed. The efficiency of SPP use in the compensator mode according to the influence on the losses of active power in the electric network is determined.

The simulation of possible distortions that can be generated in the compensator mode is performed.

Analysis of the simulation results allows us to conclude that the distortions do not exceed the allowable values. However, there is an increase in odd harmonics, especially the 5th. In addition, it is necessary to keep in mind the assumption made during the simulation that there is no distortion in the electrical network without SPP, which does not correspond to the real situation in the 10 kV networks of Ukraine.

The paper analyzes a number of measures that can be implemented by the optimal location of RES connection points, putting the SPP in the mode of reactive power compensator, and so on. The value of the efficiency indicator is determined for these measures.

*Key words:* electric networks, dispersed energy sources, electricity losses, electric saving measures, performance quality indicator, sensitivity analysis, energy efficiency.

**СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ**

*Наукові праці, в яких опубліковано основні наукові результати дисертації:*

[1] О.В. Кузьмик, В.О. Комар, та О.А. Ковальчук, "Вплив розосередженого генерування на якість функціонування розподільних електричних мереж", *Технічна електродинаміка*, №2, с. 34-35, 2012.

[2] О.В. Кузьмик, В.О. Комар, та С.Я. Вишневський, "Використання показника якості функціонування при оцінюванні місць розмикання розподільної електричної мережі", *Наукові праці Донецького національного технічного університету*, №186, вип. 11, с. 182-186, 2011.

[3] О.В. Кузьмик, П.Д. Лежнюк, В.О. Комар, та В.О. Лесько, "Оптимізація режимів розподільних електричних мереж в умовах зростання частки розосередженого генерування", *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. П.Василенка*, №129, с. 29-31, 2012.

[4] О.В. Кузьмик, В.О. Комар, Н.В. Остра, та С.Г. Гуцол, "Оцінка впливу розосередженого генерування на режим розподільних електричних мереж", *Наукові праці Донецького національного технічного університету*, №1(14), с. 104-108, 2013.

[5] О.В. Кузьмик, та В.О. Комар, "Аналіз впливу розосередженого генерування на режим роботи розподільних електричних мереж", *Вісник НТУ України «Київський політехнічний інститут». Серія «Гірництво»*, №25, с. 108-113, 2014.

[6] О.В. Сікорська, О.Є. Рубаненко, та В.О. Комар, "Комп'ютерне моделювання режимів ЛЕС з використанням їх еквівалентів". *Науковий вісник Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича. Серія: Комп'ютерні системи та компоненти*, Том 6, В.1, с.101-110, 2015.

**Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:**

[7] P. Lezhniuk, O. Rubanenko, V. Komar, and O. Sikorska, "The Sensitivity of the Model of the Process Making the Optimal Decision for Electric Power Systems in Relative Units", in *Proc. of the IEEE KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*, Kharkiv, 2020, pp. 247-252.

[8] В.О. Комар, Н.В. Остра, та О.В. Кузьмик, "Врахування динамічних еквівалентів локальних електричних систем при оптимізації режимів ЕЕС", на *IV Міжн. Наук.-техн. конф. Підвищення рівня ефективності енергоспоживання в електротехнічних пристроях і системах*, Луцьк, 2012, с. 57-58.

[9] В.О. Комар, та О.В. Кузьмик, "Оптимізація режимів ЕЕС з урахуванням розосередженого генерування", на *Міжн. конф. Контроль і управління в складних системах (КУСС-2012)*, Вінниця: ВНТУ, 2012, с. 156

[10] О.Є. Рубаненко, та О.В. Сікорська "Еквівалентування локальних електричних систем та оцінювання їх впливу на режими електричних мереж живлення підприємств АПК", на *II науково-технічної конф. Сучасні проблеми виробництва, переробки сільськогосподарської продукції, машинобудування та енергетичних систем АПК*, Вінниця, 2014, с. 28.

[11] Jean-Pierre Ngoma, Adolphe Imano Moukengue, O. Burykin, and O. Sikorska, "Power losses sensitivity to electrical power systems transits changes", in *Proceeding of the XI Intern. Scient. And Pract. Conf. Бъдещите изследвания*, Republic of Bulgaria, Sofia, 2015, pp. 6-11.

[12] П.Д. Лежнюк, В.О. Комар, та О.В. Сікорська, "Покращення техніко-економічних показників розподільних електричних мереж засобами розосередженого генерування на основі моніторингу їх режимів", на *I Всеукр. Наук. Семін. Моніторинг енерго- та ресурсовикористання в складних виробничих системах*, Луцьк, 2015, с. 91-93.

[13] О.Є. Рубаненко, В.О. Комар, та О.В. Сікорська, "Аналіз нормальних режимів розподільних електричних мереж з відновлюваними джерелами енергії засобами натурно-імітаційного моделювання", на V Всеукр. наук. семін. Проблеми і перспективи енергозбереження в комунальному господарстві та на промислових підприємствах, Луцьк, 2015, с. 133-135.

[14] P. Lezhniuk, V. Komar, N. Sobchuk, and O. Sikorska, "Evaluation of Functioning Quality of Local Electrical Systems by the Criterion Method Based on Markov Processes", in *Proceedings of Int. Scient. and Pract. Conf. Modeling, Control and Information Technologies*, Rivne, 2019, pp. 169-172, doi: 10.31713/MCIT.2019.37.

***Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:***

[15] О.В. Сікорська, О.Є. Рубаненко, та В.О. Комар, "Дослідження методів побудови еквівалентів локальних електричних систем", *Вісник Хмельницького національного університету*, №4, с. 165-173, 2015.

***Наукові праці у фахових періодичних виданнях Європейського Союзу:***

[16] O. Sikorska, A. Kylymchuk, O. Rubanenko, V. Teptia, Mergul Kozhamberdiyeva, and Konrad Gromaszek, "Control of power flow and voltage in parallel working electrical GRIDS", *Przeglad Elektrotechniczny*, vol. 93, no. 3, pp 88-92, 2017.

***Патент України на корисну модель:***

[17] П. Д. Лежнюк, О. Є. Рубаненко, О. В. Сікорська, та В. О. Комар, «Спосіб оптимального керування режимами розподільних електричних мереж з розосередженим генеруванням», *МПК(2006.01) G01R 31/00. №u201604575*, Лист.10, 2016.

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ .....	18
ВСТУП .....	20
РОЗДІЛ 1 ВПЛИВ ВІДНОВЛЮВАНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ НА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ РОЗПОДІЛЬНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ .....	28
Вплив відновлюваних джерел енергії на ефективність функціонування розподільних електричних мереж .....	29
Вплив фотоелектричних станцій на якість електричної енергії	36
Вплив відновлюваних джерел енергії на надійність розподільних електричних мереж .....	39
Вплив ВДЕ на енергоефективність мереж 35 – 110 кВ .....	43
1.5. Аналіз основних заходів підвищення енергоефективності розподільних електричних мережах .....	53
1.6 Проблема підвищення енергоефективності розподільних електричних мереж з відновлюваними джерелами енергії. Задачі подальших досліджень .....	58
РОЗДІЛ 2 ВРАХУВАННЯ ВЗАЄМВПЛИВУ МЕРЕЖ РІЗНИХ КЛАСІВ НАПРУГИ ЕНЕРГОПОСТАЧАЛЬНОЇ КОМПАНІЇ .....	62
Визначення оптимальної активної потужності ВДЕ в електричній мережі	63
Компенсація реактивності потужності в розподільних електричних мережах	69
Моделювання технічних можливостей фотоелектричні станції для компенсування реактивної потужності в електричній .....	69
Визначення необхідних реактивних потужностей ФЕС в розподільних мережах в залежності від місць їх встановлення .....	73
Визначення оптимальних реактивних потужностей, що генеруються ФЕС в розподільних ЕМ на підставі аналізу чутливості .....	77

Еквівалентування для розв'язання задачі взаємовпливу мереж різних класів напруги.....	80
Метод оцінювання взаємовпливу за узагальненими характеристиками у точці приєднання.....	85
Висновки по розділу 2.....	87
Розділ 3 АНАЛІЗ І ОЦІНЮВАННЯ ВІДПОВІДНОСТІ ПАРАМЕТРІВ РЕЖИМУ МЕРЕЖ РІЗНИХ КЛАСІВ НАПРУГИ З ВДЕ ДО ЇХ НОРМАТИВНИХ ЗНАЧЕНЬ .....	89
Натурно-імітаційне моделювання для оцінювання взаємовпливу мереж різних класів напруги .....	89
Інтегральний показник якості функціонування як засіб оцінювання рівня енергоефективності .....	93
3.3. Вибір оптимальної стратегії розвитку електричних мереж з відновлюваними джерелами енергії.....	97
Залежність напруги від навантаження споживачів і генерування ФЕС	100
Характеристика програмного забезпечення для формування залежностей напруги від навантаження і генерування ВДЕ.....	100
Техніко-економічне обґрунтування розбудова ВДЕ в електричній мережі з оцінкою відповідності параметрів нормативним значенням	106
Висновки по розділу 3.....	120
Розділ 4 РОЗРАХУНОК ВПЛИВУ ЗАХОДІВ ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ РОЗПОДІЛЬНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ З ВІДНОВЛЮВАНИМИ ДЖЕРЕЛАМИ ЕНЕРГІЇ.....	122
Визначення оптимальної потужності фотоелектричних станцій за найбільш імовірними графіками генерування та споживання.....	122
Визначення найбільш імовірних графіків споживання.....	124
Визначення оптимальної встановленої потужності ФЕС для	

схеми електричних мереж ТОВ «Вінницька птахофабрика» з врахуванням подальшого їх розвитку .....	127
Аналіз можливих точок секціонування електричної мережі з врахуванням перспектив розбудови.....	140
Без підключення ФЕС .....	140
Визначення оптимальної потужності ФЕС, яка під'єднується до ПС "Оляниця" за умови з'єднання її з ПС "Білоусівка" .....	141
Будівництво ПС "Богданівка" без підключення ФЕС.....	142
Визначення оптимальної встановленої потужності ФЕС підключеної до ПС "Оляниця" .....	143
Визначення оптимальної встановленої потужності ФЕС підключеної до ПС "Холодівка".....	145
Визначення оптимальної встановленої потужності ФЕС підключеної до ПС "Холодівка" і ПС "Оляниця".....	147
Розрахунок режиму електричної мережі з використанням фотоелектричних станцій в режимі компенсатора реактивної потужності ..	149
Розрахунок зниження втрат активної потужності в наслідок впливу на перетоки реактивної потужності фотоелектричними станціями .	150
Аналіз рівнів спотворень кривої напруги в мережі 10 кВ для різних рівнів генерованої реактивної потужності на ФЕС .....	154
Вплив різних заходів на енергоефективність електричних мереж Ямпільських РЕМ .....	157
Висновки до розділу 4.....	158
ВИСНОВКИ .....	160
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....	163
ДОДАТКИ .....	173
Додаток А Результати розрахунку втрат електричної енергії в електричних мережах 35-110 кВ АТ «Вінницяобленерго».....	174
Додаток Б Розрахунки режимів електричної мережі 110/35/10 кВ АТ	



	17
«Вінницяобленерго .....	176
Додаток В Довідки про впровадження результатів досліджень .....	191
Додаток Д Список публікацій за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації.....	194

**ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ**

АПВ	– автоматичне повторне ввімкнення;
АСКОЕ	– автоматизована система комерційного обліку електроенергії;
БСК	– батареї статичних компенсаторів;
БМР	– бібліотека можливих режимів;
ВВ	– вакуумний вимикач;
ВДЕ	– відновлювані джерела електроенергії;
ГЕС	– гідроелектрична станція;
ЕЕС	– електроенергетична система;
ЕС	– електрична станція;
ЕОМ	– електронно-обчислювальні машини;
ЕМ	– електрична мережа;
КРП	– компенсація реактивної потужності;
КГ	– когенераційне генерування;
КП	– компенсувальний пристрій;
КУ	– когенераційна установка;
ЛЕП	– лінія електропередачі;
ЛЕС	– локальна електрична система;
НІМ	– натурно-імітаційне моделювання;
ОІК	– оперативно-інформаційний комплекс;
ОПН	– обмежувач перенапруг;
ПК	– програмний комплекс;
РГ	– розосереджене генерування;
РДЕ	– розосереджені джерела електроенергії;
РЕМ	– розподільні електричні мережі;
РЗА	– релейний захист і автоматика;
РПН	– пристрій регулювання під навантаженням;
САК	– система автоматичного керування;

- СЕС – сонячна електростанція;  
ТП – трансформаторна підстанція;  
ФЕС – фотоелектрична станція;  
ЦЖ – центр живлення;  
*SAIDI* – індекс середньої тривалості довгих перерв в електропостачанні;  
*SAIFI* – індекс середньої частоти довгих перерв в електропостачанні;  
*DMS* – система управління дистрибуцією (розподілом);  
*SCADA* – система диспетчерського управління і збору даних.

## ВСТУП

**Обґрунтування вибору теми дослідження.** В останні роки в Україні зростає частка місцевих джерел електроенергії в енергобалансі енергосистем. Розподільні електричні мережі (ЕМ) 110(35)-10(6) кВ проектувались в умовах централізованого електропостачання з використанням схемних рішень, які забезпечували вимоги надійності та якості електропостачання споживачів. Приєднання до них розосереджених джерел електроенергії (РДЕ) співмірної встановленої потужності призвело до невідповідності експлуатаційних умов ЕМ, а отже, до необхідності розв'язання нових задач, пов'язаних з забезпеченням комбінованого електропостачання – від електроенергетичної системи і розосередженого генерування.

Вплив РДЕ на режими мереж суттєво залежить від графіка роботи та встановлених потужностей РДЕ, а також місця приєднання до електричної мережі. Якщо встановлена потужність РДЕ перевищує 20 % від сукупного навантаження ЕМ, то може спостерігатися негативний вплив на втрати електроенергії [1]–[3], а відповідно на енергоефективність функціонування розподільних електричних мереж. Енергоефективність характеризується рівнем надійності (безперервності) електропостачання, економічністю надання послуг з передачі, розподілу та постачання електричної енергії, а також якістю електричної енергії [4].

В розподільних електричних мережах раніше не приверталось достатньої уваги до їх енергоефективності. Важливішим вважалось забезпечення необхідного рівня надійності електропостачання споживачів. До того ж ці мережі конструктивно не пристосовані до оптимального керування, оскільки до останнього часу не мали засобів телеінформації про параметри поточного режиму та засобів оперативного керування останніми [2].

Саме тому Національна комісія, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг (НКРЕКП) разом з ДП „Енергоринок” зобов'язала всіх учасників ринку електроенергії

встановлювати в своїх мережах автоматизовані системи комерційного обліку електроенергії (АСКОЕ), які в подальшому будуть інтегровані в єдину систему збору, оброблення та збереження інформації про відпущену електроенергію [5]–[6]. Застосування АСКОЕ простимулювало посилення інтересу до задачі планування заходів з підвищення енергоефективності розподільних електричних мереж на базі [7]–[9].

Наявність інформації про значення режимних параметрів та балансових втрат електроенергії в ЕМ дасть можливість вирішити поставлену задачу та виокремити з балансових втрат складову, що пов'язана з транзитними перетіканнями електроенергії від РДЕ та живильних підстанцій на межі балансової належності. Складність задачі оцінювання впливу функціонування РДЕ на втрати електроенергії в ЕМ полягає в тому, що втрати залежать від перетоків у лініях та трансформаторах мережі нелінійно. Прямо скористатися методом накладання неможливо. Тому у дослідженні використано розв'язання поставленої задачі за лінеаризованими моделями усталених режимів ЕМ.

Для забезпечення адекватності висновків буде виконано низку практичних розрахунків з використанням уточнених методів визначення втрат електроенергії в мережах на основі вимірювань електричних параметрів та даних АСКОЕ.

Проблемі підвищення рівня енергоефективності електричних мереж, присвячено значну кількість публікацій відомих наукових шкіл, зокрема Б. С. Стогнія, О. В. Кириленка, Ю. С. Железка, П. Д. Лежнюка, Ю. О. Варецького, Б. С. Рогальського та ін.

Отже, вдосконалення методів вибору складу заходів з підвищення енергоефективності в розподільних електричних мережах з відновлюваними джерелами енергії є актуальною задачею.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.**  
Дисертація виконана в плані наукових досліджень, які проводилися

кафедрою електричних станцій та систем Вінницького національного технічного університету за держбюджетними темами: «Оптимізація функціонування електричних мереж енергосистем в умовах зростання навантаження споживачів та децентралізації їх живлення» (№ держреєстрації 0110U002161), «Методи та засоби оптимізації сумісної роботи локальних електричних систем з відновлюваними джерелами енергії та систем централізованого електропостачання» (№ держреєстрації 0113U003138) та «Інтелектуалізація електроенергетичних систем з відновлюваними джерелами енергії на основі принципу Гамільтона-Остроградського» (№ держреєстрації 015U001120), «Інтегрування нетрадиційних та відновлюваних джерел енергії в електричні мережі для підвищення їх енергоефективності з використанням SMART GRID технологій» (№ держреєстрації 0118U000206). Автор брала участь у виконанні вищевказаних робіт як виконавець.

**Мета і завдання дослідження.** Метою даної роботи є аналіз і оцінювання впливу відновлюваних джерел енергії на рівень енергоефективності розподільних електричних мереж.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі **основні** задачі:

- дослідити вплив відновлюваних джерел енергії на складові енергоефективності розподільних електричних мереж в межах одного класу напруги;
- виконати аналіз взаємовпливу розподільних електричних мереж різних класів напруги з відновлюваними джерелами енергії;
- виконати аналіз засобів підвищення енергоефективності, які ґрунтуються на застосуванні технічних особливостей відновлюваних джерел енергії;
- розробити метод, що дозволить врахувати взаємовплив електричних мереж різних класів напруги з відновлюваними джерелами енергії під час розрахунку нормальних режимів;
- розробити метод оцінювання рівня енергоефективності електричних мереж в умовах поетапного впровадження заходів з її підвищення;

– розробити метод оптимізації генерованої реактивної потужності фотоелектричними станціями в електричних мережах на підставі аналізу чутливості втрат електроенергії.

**Об’єктом дослідження** дисертаційної роботи є нормальні режими розподільних електричних мереж з розосередженими джерелами електроенергії., а **предметом дослідження** – методи і засоби підвищення енергоефективності розподільних мереж з розосередженими джерелами енергії.

**Методи досліджень.** Для аналізу та розв’язання поставлених задач дослідження було використано математичний апарат теорії подібності та аналізу чутливості, нелінійного програмування. Усталені режими моделюються на базі методу вузлових напруг та аналізуються із застосуванням методів Гаусса та Ньютона. Оцінювання якості функціонування ЕМ здійснюється з використанням марковських процесів і критеріального моделювання.

#### **Наукова новизна отриманих результатів.**

1. Вперше з використанням математичного моделювання та результатів натурного експерименту показано вплив різних типів відновлюваних джерел енергії на рівень енергоефективності розподільних електричних мереж, що дозволило сформулювати умови комплексного розв’язання задачі, яка включає в себе зменшення втрат електроенергії та покращення її якості, а також підвищення надійності, і дозволяє розробити етапність впровадження заходів з підвищення ефективності функціонування електричних з ВДЕ.

2. Набув подальшого розвитку метод визначення взаємовпливу електричних мереж різних класів напруги шляхом врахування режиму роботи відновлюваних джерел енергії в мережах нижчих класів напруги через уточнення напрямків перетікання потужності та її значення в точці примикання до мереж вищих класів напруги.

3. Вдосконалено, використовуючи апарат аналізу чутливості, метод формування заходів зі зменшення втрат в електричних мережах з

врахуванням їх впливу на якість напруги в них, зокрема шляхом використання фотоелектричних станцій в режимі компенсації реактивної потужності.

**Практичне значення отриманих результатів** полягає в тому, що: на підставі виконаних досліджень вирішено актуальну задачу забезпечення енергетичної ефективності та якості електропостачання в розподільних електричних мережах з відновлюваними джерелами енергії. Результати досліджень створюють достатню наукову базу для визначення впливу ВДЕ на якість електропостачання різного рівня локальності, а саме, як окремих споживачів та населених пунктів, так і енергопостачальних компаній в цілому.

Розроблені алгоритми оцінювання ефективності функціонування розподільних електричних мереж 10(6) кВ дозволяють комплексно оцінювати заходи з підвищення енергоефективності ЕМ з ВДЕ.

Працездатність та ефективність запропонованих у роботі методів і алгоритмів підтверджено обчислювальними експериментами для реальних електричних мереж та порівнянням їх із фактичними даними.

Отримані наукові результати були використані під час розроблення рекомендацій щодо техніко-економічних обґрунтувань розвитку відновлюваної енергетики, які прийнято до впровадження у АТ "Вінницяобленерго". Результати дисертаційної роботи також використовуються у навчальному процесі кафедри електричних станцій і систем ВНТУ.

**Особистий внесок здобувача.** Всі наукові положення, які є основним змістом дисертаційної роботи, розроблено та обґрунтовано здобувачем особисто. У роботах, що опубліковано у співавторстві, внесок автора такий: [1] – виконано аналіз зміни якості функціонування розподільної електричної мережі з ВДЕ; [2] – запропоновано алгоритм оцінювання місць розмикання розподільної електричної мережі з врахуванням оптимальної встановленої потужності ВДЕ; [3] – побудова критеріальної моделі для алгоритму оцінки якості функціонування системи компенсації впливу збурень на втрати



потужності в мережах; [4] – досліджено зміну перетоків потужності на головній ділянці від потужності і місця розташування РДЕ і вдосконалено метод взаємовпливу мереж ЛЕС; [5] – побудова блок-схеми алгоритму створення узагальнюючих залежностей режиму ЛЕС; [6] – виконання комп'ютерного натурно-імітаційного моделювання режимів ЛЕС та створення бази можливих режимів; [7] – запропоновано здійснювати оптимальний контроль стану системи шляхом введення параметрів управління в область оптимальності для функціонування автоматичних систем контролю стану електроенергетичної системи з урахуванням чутливості; [8] – запропонована адаптивна система керування з врахуванням узагальнюючих залежностей для режимів ЛЕС; [10] – побудова алгоритму адаптивної системи керування з використанням ретроспективних даних; [11] – розроблено метод оцінки чутливості параметрів режиму до зміни навантаження у вузлах і реактивної потужності ФЕС; [12] – виконання розрахунків для визначення економічно і технічно доцільного значення потужності ВДЕ в локальній електричній мережі; [13] – розробка процесу організації натурно-імітаційного моделювання нормальних режимів ЕМ в реальному часі в умовах неповноти вихідної інформації; [14] – використання критеріального методу та марковських процесів для оцінки якості функціонування відновлюваних джерел енергії у вигляді інтегрованої характеристики ефективності локальної електричної системи; [15] – показано особливості різних методів виділення ЛЕС з ЕЕС; [16] – побудова блок-схеми алгоритму для визначення оптимального режиму трансформаторів з РПН; [17] – запропоновано спосіб оптимального керування режимами розподільних електричних мереж з розосередженим генеруванням, який в умовах неповноти початкових даних про режими розподільних електричних мереж з розосередженим генеруванням.

Результати теоретичних досліджень, що викладені у [1]–[17], були отримані у Вінницькому національному технічному університеті.

**Апробація матеріалів дисертації.** Головні результати дисертаційної роботи доповідалися та обговорювалися на:

- на XL, XLI, XLII, XLIII, XLIV, XLIX регіональній науково-технічній конференції професорсько-викладацького складу, співробітників та студентів університету з участю працівників науково-дослідних організацій та інженерно-технічних працівників підприємств м. Вінниці та області (м. Вінниця, Вінницький національний технічний університет, 2011, 2012, 2013, 2014, 2015, 2020);

- на I, II, III Міжнародній науково-технічній конференції «Оптимальне керування електроустановками» (м. Вінниця, 2011, 2013, 2015);

- на IV та V Міжнародній науково-технічній конференції «Підвищення рівня ефективності енергоспоживання в електротехнічних пристроях і системах» (м. Луцьк – Шацькі озера, 2012, 2014)

- на XII Міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми сучасної електротехніки (ПСЕ–2012)» (м. Вінниця, 2012);

- на XI Міжнародній науковій конференції «Контроль і управління в складних системах (КУСС-2012)» (м. Вінниця, 2012);

- на 3-х науково-технічних семінарах НАН України «Електричні мережі енергосистем з нетрадиційними і відновлювальними джерелами енергії», (м. Вінниця, 2013, 2014, 2015)

- на VI міжнародній науково-технічній конференції «Керування режимами роботи об'єктів електричних та електромеханічних систем – 2013» (м. Донецьк, 2013);

- на VI міжнародній науково-технічній конференції «Енергетика. Екологія. Людина» (м. Київ, 2014) ;

- на II науково-технічній конференції «Сучасні проблеми виробництва, переробки сільськогосподарської продукції, машинобудування та енергетичних систем АПК» ( м. Вінниця, 2014);

- на I всеукраїнській науково-технічній конференції «Електротехнічні системи, електрифікація й автоматизація в агропромисловому комплексі» (м. Вінниця, 2014);

- на I всеукраїнському науковому семінару «Моніторинг енерго- та ресурсовикористання в складних виробничих системах» (м. Луцьк, 2015);

- на V Всеукраїнському науковому семінару «Проблеми і перспективи енергозбереження в комунальному господарстві та на промислових підприємствах», (м. Луцьк, 2015);
- на Міжнародній науково-практичній конференції: Моделювання, управління та інформаційні технології (м. Рівне, 2019)
- на Міжнародній науковій конференції з енергетики, електроніки та сучасних технологій «IEEE KhPI Week on Advanced Technology», (м. Харків, 2020).

**Публікації.** За результатами виконаних досліджень опубліковано 17 наукових робіт з них: 1 стаття в журналах, що входять до науково-метричної бази Scopus, 6 опубліковані у фахових виданнях з переліку ДАК України, 1 публікація у періодичних виданнях ЄС, 1 патент на корисну модель.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертаційна робота складається з вступу, чотирьох розділів, висновків, додатків, списку використаних джерел (83 найменувань). Основний зміст викладений на 175 сторінках друкованого тексту, містить 114 рисунків. Загальний обсяг дисертації – 198 сторінок.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- [1] ГНД 34.09.204.2004 Методичні вказівки з аналізу технологічних витрат електроенергії та вибору заходів щодо їх зниження, затверджені наказом Міністерства палива та енергетики України від 09.06.2004 № 300.
- [2] Звіт про результати діяльності Національної комісії, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг, у 2018 році. Постанова НКРЕКП від 29.03.2019 № 440. [Електронний ресурс].  
Доступно:  
[https://www.nerc.gov.ua/data/filearch/Catalog3/Richnyi\\_zvit\\_NKREKP\\_2018.pdf](https://www.nerc.gov.ua/data/filearch/Catalog3/Richnyi_zvit_NKREKP_2018.pdf)
- [3] П.Д. Лежнюк, В.О. Комар, та В.В. Кулик, "Вплив відновлюваних джерел енергії на функціонування розподільних електричних мереж", *Енергетика та електрифікація*, № 1, с. 8- 12, 2015.
- [4] В.М Матюшок., Серджио Бруно, С.А. Балашова, и К.Г. Гомонов, "Влияние smart grid и возобновляемых источников энергии на энергоэффективность: зарубежный опыт", *Вестник РУДН. Серия: Экономика*, № 4, с. 583- 598, 2017.
- [5] С.А. Рабчинский, "Стадии и этапы создания интегрированных автоматизированных систем диспетчерского управления и учета электроэнергии", *Енергетика и електрифікація.*, № 2., с. 6-12, 2004.
- [6] С.А. Рабчинский, "Основные принципы создания современных автоматизированных систем учета электроэнергии Оптового рынка электрической энергии Украины", *Енергетика и електрифікація*, № 1, с. 13-17, 2001.
- [7] А.В. Праховник, О.В. Коцар, та В.І. Прокопеч, "Сучасні принципи побудови АСКОЕ суб'єктів ОРЕ та АСКОЕ споживачів в умовах енергоринку України", *Енергетика і електрифікація*, № 4, с. 2-7, 2006.
- [8] А.В. Праховник, В.П. Калинчик, и В.И. Прокопеч, "Проблемы,

препятствия и пути создания автоматизированных систем контроля и учета электрической энергии", *Новини енергетики*, № 5, с. 51-54, 2007.

- [9] П.Д. Лежнюк, та О.А. Буславець, "Застосування Smart Grid технологій для балансування режимів в локальних електричних системах", *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства. Серія «Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України»*, №195, с. 3-6, 2018.
- [10] P. Lezhniuk, O. Rubanenko, V. Komar, and O. Sikorska, "The Sensitivity of the Model of the Process Making the Optimal Decision for Electric Power Systems in Relative Units", in *Proc. of the IEEE KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*, Kharkiv, 2020, pp. 247-252.
- [11] Ю.В. Щербина, Н.Д. Бойко, и А.Н. Бутенко, *Снижение технологического расхода энергии в электрических сетях*. Киев, Україна: Техніка, 1981.
- [12] Ю. С. Железко, А. В. Артемьев, и О. В. Савченко, *Расчет и анализ потерь электроэнергии в электрических сетях*. Москва, Российская Федерация: ЭНАС, 2008.
- [13] Ю.С. Железко, *Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии: Руководство для практических расчетов*. Москва, Российская Федерация: ЭНАС, 2009.
- [14] Методичні рекомендації визначення технологічних втрат електричної енергії в трансформаторах і лініях електропередавання. Київ, Україна: Міненерговугілля України, 2013. [Електронний ресурс]. Режим доступу: [http://www.leonorm.com/p/NL\\_DOC/UA/201301/Nak399.htm](http://www.leonorm.com/p/NL_DOC/UA/201301/Nak399.htm)
- [15] О.А. Буславець, П.Д. Лежнюк, та М.М. Черемісін, *Інформаційне забезпечення задач зменшення втрат електроенергії в електричних мережах*. Вінниця, Україна: ВНТУ, 2020.
- [16] Звіт про результати діяльності Національної комісії, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг, у 2019 році. Постановою НКРЕКП від 27.05.2020 № 975. [Електронний

ресурс].

Доступно:

[https://www.nerc.gov.ua/data/filearch/Catalog3/Richnyi\\_zvit\\_NKREKP\\_2019.pdf](https://www.nerc.gov.ua/data/filearch/Catalog3/Richnyi_zvit_NKREKP_2019.pdf)

- [17] О.В. Кузьмик, В.В. Комар, та О.А. Ковальчук, "Вплив розосередженого генерування на якість функціонування розподільних електричних мереж", *Технічна електродинаміка*, №2. с. 34-35, 2012.
- [18] О.В. Кузьмик, В.В. Комар, та С.Я. Вишневський, "Використання показника якості функціонування при оцінюванні місць розмикання розподільної електричної мережі", *Наукові праці Донецького національного технічного університету*, №186, В.11, с. 182-186, 2011.
- [19] P. Lezhniuk, V. Komar, O. Rubanenko, and N. Ostra, "The sensitivity of the process of optimal decisions making in electrical networks with renewable energy sources", *Przeglad Elektrotechniczny*, no.10, 2020, pp. 32-38. DOI: 10.15199/48.2020.10.05.
- [20] П.Д. Лежнюк, В.В. Кулик, та О.Б. Бурикін, *Взаємовплив електричних мереж і систем в процесі оптимального керування їх режимами: Монографія*. Вінниця, Україна: УНІВЕРСУМ-ВІННИЦЯ-Вінниця, 2008.
- [21] О.А. Буславець, О.Б. Бурикін, та П.Д. Лежнюк, "Вплив транзитних перетоків потужності на втрати електроенергії в електричних мережах", *Технічна електродинаміка*, №4, с. 71-73, 2016.
- [22] Н.М. Черемисин, О.А. Буславец, и В.В. Черкашина, "Перспективные оценки повышения эффективности электрических сетей" *Енергетика та комп'ютерно-інтегровані технології в АПК*, №2(2), с.6 – 9,2014.
- [23] П.Д. Лежнюк, В.О. Комар, С.В. Кравчук, та І.В. Котилко, "Вплив розосередженого генерування на надійність роботи електричних мереж", *Вісник Національного технічного університету «ХПИ»*. Серія: *Нові рішення в сучасних технологіях.*, №45, с. 25-31, 2018. doi:10.20998/2413-4295.2018.45.04
- [24] Б.С. Рогальський, О.М. Нанака, А.В. Праховник, М.А. Денисенко, та

- В.М. Божко, "Концепція компенсації реактивної потужності в електричних мережах споживачів та енергопостачальних компаній", *Енергетика та електрифікація*, № 6, с. 23-30, 2006.
- [25] П.Д. Лежнюк, *Аналіз чутливості оптимальних рішень в складних системах критеріальним методом: Монографія*. Вінниця, Україна: УНІВЕРСУМ-ВІННИЦЯ, 2003.
- [26] П.Д. Лежнюк, О.А. Ковальчук, О.В. Нікіторович, та В.В. Кулик, *Відновлювані джерела енергії в розподільних електричних мережах: Монографія*. Вінниця, Україна: ВНТУ, 2014.
- [27] В.Г. Дерзский, "Тарифная политика и потери электроэнергии в распределительных сетях", *Энергетика и электрификация*, № 4, с. 25-30, 2003.
- [28] А.А. Потребич, "Определение цены на продаваемую электроэнергию по классам напряжения электрической сети энергокомпании", *Энергетика и электрификация*, № 10, с. 13–15, 2005.
- [29] М.М. Черемісін, В.В. Черкашина, та В.О. Поясник, "Особливості керування режимами роботи електричних мереж на сучасному етапі", *Наукові праці Донецького технічного університету. Серія "Електротехніка і електроенергетика"*, Вип. 1(14), с.300 - 304, 2013.
- [30] Б. В. Циганенко, Д. М. Сумський, В. В. Кирик, та Т. Л. Кацадзе, "Підвищення енергоефективності розподільних мереж з використанням SMART-технологій", *Electronics and communications*. Т. 21, № 4, с. 58-64, 2016.
- [31] В.О. Комар, та А.Л. Поліщук, "Узагальнена техніко-економічна оцінка ефективності реконструкції розподільних електричних мереж", *Вісник Львівського національного технічного університету*, №666, с. 47-52, 2010.
- [32] І.В. Кузьмін, "Критерії оцінки ефективності, якості та оптимальності складних систем", *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, №1, с. 5-9, 1994.

- [33] Л.Н. Добровольська, В.О. Бондаренко, та В.В. Черкашина, *Підвищення рівня ефективності енергоспоживання в електротехнічних пристроях і системах. Монографія*. Луцьк, Україна: ЛНТУ, 2017.
- [34] В.Ф. Коротков, *Автоматическое регулирование в электроэнергетических системах*. Москва, Российская Федерация: ИД МЭИ, 2013.
- [35] Ф.Г. Гусейнов, и О.С. Мамедьяров, *Планирование эксперимента в задачах электроэнергетики*. Москва, Российская Федерация: Энергоатомиздат, 1988.
- [36] Л.А. Жуков, и И.П. Стратан, *Установившиеся режимы сложных электрических сетей и систем: Методы расчётов*. Москва, Российская Федерация: Энергия, 1979.
- [37] Под общ. ред. И.В. Кузьмина, *Основы моделирования сложных систем: Учеб. пособие для студентов вузов*. Киев, СССР: Вища школа, 1981.
- [38] Б.М. Бухгольц, и Э.А. Стычински, *SmartGrids – основы и технологии энергосистем будущего*. Москва, Российская Федерация: ИДМЭИ, 2017.
- [39] P. Lezhniuk, S. Kravchuk, and O. Buslavets, "Selfoptimization Modes of Electric Grids with Renewable Energy Sources Using the Principle of Least Action", in *Proceeding of the IEEE 6th International Conference on Energy Smart Systems*, 2019. DOI: 10.1109/ESS.2019.8764181
- [40] В.М. Сулейманов, В.А. Баженов, та Т. Л. Кацадзе, "Моделі та методи оптимізації розвитку основних мереж енергосистем в умовах ринкових відносин", *Енергетика*. № 4, с. 58-66, 2014.
- [41] В.Ф. Коротков, *Автоматическое регулирование в электроэнергетических системах*. Москва, Российская Федерация: ИД МЭИ, 2013.
- [42] Fausto A.Canales, Jakub Jurasz, Alexandre Beluco, and Alexander Kies, "Assessing temporal complementarity between three variable energy sources by means of correlation and compromise programming," *Preprint*, pp.1-17, 2019. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/1905.00117>
- [43] Y. Xu, Z. Yang, W. Gu, M. Liand Z. Deng, "RobustReal-



- TimeDistributedOptimalControlBasedEnergyManagementin a SmartGrid," *IEEE Transactionson SmartGrid*, vol. 8, no. 4, pp. 1568-1579, 2017.
- [44] А.П. Бурман, Ю.К. Розанов, и Ю.Г. Шакарян, *Управление потоками электроэнергии и повышение эффективности электроэнергетических систем*. Москва, Российская Федерация: ИД МЭИ, 2012.
- [45] Efim Rozenwasser, and Rafael Yusupov, *Sensitivity of Automatic Control Systems*. CRC Press, 2019.
- [46] B.T. Rearden, "Perturbation Theory Eigenvalue Sensitivity Analysis with Monte Carlo Techniques", *Nuclear Science and Engineering*, vol.146, no.3, pp. 367-382, 2004. DOI: 10.13182/NSE03-03.
- [47] Angela Dean, Daniel Voss, and Danel Draguljic, *Design and Analysis of Experiments. Second Edition*. New York, USA: Springer Texts in Statistics", 2017. DOI: 10.1007/978-3-319-52250-0
- [48] С.С. Ананичева, П.Е. Мезенцев, и А.Л. Мызин, *Электроэнергетические системы и сети: модели развития*. Москва, Российская Федерация: Юрайт, 2018.
- [49] В.А. Веников. *Теория подобия и моделирования*. Москва, СССР: Высшая школа, 1976.
- [50] Ю.Н. Астахов, и П.Д. Лежнюк, "Применение теории подобия в задачах управления нормальными режимами электроэнергетических систем", *Энергетика и транспорт*, № 5, с. 3-11, 1990.
- [51] P.D. Lezhniuk, V.O. Komar, D.S. Sobchuk, V.V. Teptia, and Michalina Gryniwicz-Jaworska, "Integral Index of Quality for Evaluation of Impact of Distributive Generation Sources on Electric Network Modes", *Advances in Science and Technology. Research Journal*, vol. 11, no.2, pp. 65-71, June, 2017. DOI: 10.12913/22998624/70760.
- [52] P.D. Lezhniuk, V.V. Kulik, and D.I. Obolonsky, "Modeling and compensation of the influence of heterogeneity of electric networks on the efficiency of their modes", *Electricity*, no. 11, pp. 2-8, 2007.

- [53] Е.Н. Розенвассер, и Р.М. Юсупов, *Чувствительность систем управления*. Москва, СССР: Наука, 1981.
- [54] R. Duffin, E. Peterson, and C. Zener, *Geometric programming*. Per. Sangl. Moskva, USSR: Mir, 1972.
- [55] А.Н. Тихонов, А.В. Гончарский, В.В. Степанов, и А.Г. Ягола, *Численные методы решения некорректных задач*. Москва, Российская Федерация: Наука, 1990.
- [56] П.Д. Лежнюк, В.В. Кулик, та О.Б. Бурикін, *Взаємовплив електричних мереж і систем в процесі оптимального керування їх режимами. Монографія*. Вінниця, Україна: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2008.
- [57] П.Д. Лежнюк, В.В. Кулик, та О.Б. Бурикін, "Оцінка взаємовпливу електричних мереж енергосистем з трансформаторними зв'язками ", *Технічна електродинаміка. Тематичний випуск: проблеми сучасної електротехніки*, ч.7, с. 27-30, 2006.
- [58] П. Д. Лежнюк, В. В. Кулик, О. Б. Бурикін, та А. Л. Поліщук, "Додаткові втрати електроенергії як результат взаємовпливу електричних мереж ", *Енергетика: проблеми та перспективи. Погляд громадськості*, №4, с. 180-184, 2007.
- [59] О.В. Кузьмик, В.О. Комар, Н.В. Остра, та С.Г. Гуцол, "Оцінка впливу розосередженого генерування на режим розподільних електричних мереж", *Наукові праці Донецького національного технічного університету*, №1(14), с. 104-108, 2013.
- [60] О.Є. Рубаненко, та О.В. Сікорська "Еквівалентування локальних електричних систем та оцінювання їх впливу на режими електричних мереж живлення підприємств АПК", *на II науково-технічної конф. Сучасні проблеми виробництва, переробки сільськогосподарської продукції, машинобудування та енергетичних систем АПК*, Вінниця, 2014, с. 28.

- [61] A.A. Ishchenko, M.A. Myrzik, and W.L. Kling, "Dynamic Equivalencing of Distribution Networks with Dispersed Generation ", *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 06, pp. 1-8, 2006.
- [62] Feng Ma, Xiaochuan Luo, and Vijay Vittal, "Application of Dynamic Equivalencing in Large-scale Power Systems", *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 05, pp. 1-10, 2011.
- [63] О.В. Сікорська, О.Є. Рубаненко, та В.О. Комар, "Комп'ютерне моделювання режимів лес з використанням їх еквівалентів". *Науковий вісник Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича. Серія: Комп'ютерні системи та компоненти*, Том 6, В.1, с.101-110, 2015.
- [64] О.В. Сікорська, О.Є. Рубаненко, та В.О. Комар, "Дослідження методів побудови еквівалентів локальних електричних систем", *Вісник Хмельницького національного університету*, №4, с. 165-173, 2015.
- [65] В.О. Комар, Н.В. Остра, та О.В. Кузьмик, "Врахування динамічних еквівалентів локальних електричних систем при оптимізації режимів ЕЕС", *на IV Міжн. Наук.-техн. конф. Підвищення рівня ефективності енергоспоживання в електротехнічних пристроях і системах*, Луцьк, 2012, с. 57-58.
- [66] P. Lezhniuk, V. Komar, N. Sobchuk, and O. Sikorska, "Evaluation of Functioning Quality of Local Electrical Systems by the Criterion Method Based on Markov Processes", *in Proceedings of Int. Scient. and Pract. Conf. Modeling, Control and Information Technologies*, Rivne, 2019, pp. 169-172, doi: 10.31713/MCIT.2019.37.
- [67] П.Д. Лежнюк, О.Є. Рубаненко, О.В. Сікорська, та В.О.Комар "Спосіб оптимального керування режимами розподільних електричних мереж з розосередженим генеруванням", *МПК (2006.01) G01R31/00. №u201604575*. Лист. 11, 2016.
- [68] О.В. Кузьмик, та В.О. Комар, "Аналіз впливу розосередженого генерування на режим роботи розподільних електричних мереж", *Вісник*

*НТУ України «Київський політехнічний інститут». Серія «Гірництво», №25, с. 108-113, 2014.*

- [69] О.В. Кузьмик, П.Д. Лежнюк, В.О. Комар, та В.В. Лесько, "Оптимізація режимів розподільних електричних мереж в умовах зростання частки розосередженого генерування", *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. П.Василенка*, №129, с. 29-31, 2012.
- [70] В.О. Комар, та О.В. Кузьмик, "Оптимізація режимів ЕЕС з урахуванням розосередженого генерування", *на Міжн. конф. Контроль і управління в складних системах (КУСС-2012), Вінниця: ВНТУ, 2012, с. 156*
- [71] А.Ф. Верлань, и В.В. Галкин, *Имитация динамики энергетических объектов в системах испытания программных средств управления*. Киев, Украина: Наукова думка, 1991.
- [72] Б.І. Мокін, П.Д. Лежнюк, та Ю.В. Лук'яненко, "Імітаційне моделювання в оптимальному керуванні нормальними режимами електричної системи", *Вісник ВПІ*, № 3, с. 5-9, 1995.
- [73] П.Д. Лежнюк, та В.М. Гайдамака, "Натурно-імітаційне моделювання з використанням критеріального методу в оптимальному керуванні електроненергетичними системами", *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 1, с. 37-41, 2003.
- [74] О.Є. Рубаненко, В.О. Комар, та О.В. Сікорська, "Аналіз нормальних режимів розподільних електричних мереж з відновлюваними джерелами енергії засобами натурно-імітаційного моделювання", *на V Всеукр. наук. семін. Проблеми і перспективи енергозбереження в комунальному господарстві та на промислових підприємствах*, Луцьк, 2015, с. 133-135.
- [75] Л.Н. Добровольська, В.В. Кулик, та П.Д. Лежнюк, *Електроощадні технології в електроенергетичних системах*. Луцьк, Україна: Вежа-Друк, 2018.

- [76] П.Д. Лежнюк, В.О. Комар, та Д.С. Собчук, *Підвищення якості електропостачання шляхом розбудови відновлюваних джерел електроенергії: монографія*. Луцьк, Україна: Видавництво Луцького НТУ, 2015.
- [77] Т. Л. Кацадзе, О. М. Паненко, та О. М. Янковська, "Мультиагентне управління оптимальним розмиканням розподільних електричних мереж". *Енергетика: економіка, технології, екологія*, № 1, с. 41-48, 2019.
- [78] P. Lezhniuk, V. Komar, S. Kravchuk, and D. Sobchuk, "Mathematical modeling of operation quality of electric grid with renewable sources of electric energy", in *Proceeding of the IEEE Intern. Conf. Modern electrical and energy systems*, 2017, pp. 324 - 327.
- [79] P. Lezhniuk et.al, "Mathematical modeling of operation quality of electric grid with renewable sources of electric energy", in *Proceeding of the IEEE Intern. Conf. Modern electrical and energy systems*, 2017, pp. 324-327.
- [80] Ю.Н. Астахов, и П. Д. Лежнюк, *Применение критериального метода в электроэнергетике*. Киев, СССР: УМК ВО, 1989.
- [81] Jean-Pierre Ngoma, Adolphe Imano Moukengue, O. Burykin, and O. Sikorska, "Power losses sensitivity to electrical power systems transits changes", in *Proceeding of the XI Intern. Scient. And Pract. Conf. Бъдещите изследвания*, Republic of Bulgaria, Sofia, 2015, pp. 6-11.
- [82] П.Д. Лежнюк, В.О. Комар, та О.В. Сікорська, "Покращення техніко-економічних показників розподільних електричних мереж засобами розосередженого генерування на основі моніторингу їх режимів", на *I Всеукр. Наук. Семін. Моніторинг енерго- та ресурсовикористання в складних виробничих системах*, Луцьк, 2015, с. 91-93.
- [83] O. Sikorska, A. Kylymchuk, O. Rubanenko, V. Teptia, Mergul Kozhamberdiyeva, and Konrad Gromaszek, "Control of power flow and voltage in parallel working electrical GRIDS", *Przeglad Elektrotechniczny*, vol. 93, no. 3, pp 88-92, 2017.

