

Вінницький національний технічний університет
Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

КОТИЛКО ІРИНА ВАДИМІВНА

УДК 621.316.1.29

ДИСЕРТАЦІЯ
ОПТИМІЗАЦІЯ СУМІСНОГО ВИКОРИСТАННЯ РІЗНОТИПНИХ
ВІДНОВЛЮВАЛЬНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ
НАДІЙНОСТІ РОБОТИ 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.

_____ І. В. Котилко

Науковий керівник: Лежнюк Петро Дем'янович, доктор технічних наук,
професор

Вінниця – 2019

АНОТАЦІЯ

Котилко І. В. Оптимізація сумісного використання різнотипних відновлювальних джерел енергії для підвищення надійності роботи 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, 2019.

Національний план дій з відновлювальної енергетики на період до 2020 р. передбачає, що частка генерації з відновлювальних джерел енергії в кінцевому енергоспоживанні має сягнути 11%.

Зараз Україна демонструє найвищі у світі темпи у підписанні договорів на майбутнє приєднання ВДЕ, але це продукує великі ризики для застарілої електроенергетичної системи. За офіційною інформацією Національної комісії, яка здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг (НКРЕКП), в І кв. 2018 р. було введено в експлуатацію 159,4 МВт генерувальних потужностей – 54 об'єкти електроенергетики (у 2,4 раза перевищує потужності, введені в експлуатацію за аналогічний період 2017 р.). При цьому вітроелектричні станції (ВЕС) та фотоелектричні станції (ФЕС) складають 92% введених потужностей, а середня одинична потужність введених в цей час об'єктів електроенергетики складає 3 МВт. Встановлена потужність ВЕС та ФЕС в Україні станом на кінець 2019 року сумарно складає 3653 МВт, ці потужності впливають на баланс електроенергії в системі, їх відхилення від прогнозованого графіка генерації компенсуються маневровими потужностями.

У 2017 р. кількість виданих технічних умов і підписаних договорів з НЕК «Укренерго» на приєднання до високовольтних мереж об'єктів «зеленої енергетики», порівняно з 2016 р., зросла більш ніж у 30 разів за показником потужності і така тенденція зберігається.

За даними Укренерго до 2025 р. вже видано технічних умов (ТУ) на приєднання до мереж установок «зеленої» енергетики потужністю 7426 МВт

(ВЕС – 4200 МВт, ФЕС – 3226 МВт, без урахування великих ГЕС та ГАЕС) і кількість зростає. Однак об'єднана енергетична система (ОЕС) може прийняти лише до 5 тис. МВт потужностей сонячних і вітрових електростанцій без ризику розбалансування та серйозних змін у своїй структурі.

Системний оператор у своєму дослідженні наголошує, що ФЕС та ВЕС, з погляду стабільності електропостачання, – ненадійні. Відхилення від планових графіків протягом доби складає понад 450 МВт при встановленій потужності 1217 МВт. Ще однією специфікою встановлення відновлювальних джерел енергії є їх нерівномірне розміщення по всій Україні. Таким чином, наявність одного потужного джерела до 3 МВт або декількох менш потужних до 0,5 МВт, що під'єднані до однієї підстанції розподільної електричної мережі (РЕМ), дають можливість розглядати РЕМ як локальну електричну систему (ЛЕС).

Особливо гостро для розподільних електричних мереж постає питання надійності та безперебійності електропостачання. Згідно з постановою НКРЕКП від 12.06.2018 «Про затвердження Порядку забезпечення стандартів якості електропостачання та надання компенсацій споживачам за їх недотримання» визначено показник, що якісно характеризує рівень надійності роботи ЕМ. Але, враховуючи темпи збільшення потужності генерування відновлювальних джерел енергії (ВДЕ), зокрема ФЕС, доцільно провести аналіз зміни визначених показників в умовах її зростання.

Нестабільний характер роботи відновлювальних джерел енергії впливає на режими роботи електричних мереж. Нестабільність генерування ФЕС компенсується потужністю, яка надходить в РЕМ з енергосистеми. Через те умови балансування режиму РЕМ впливають і на режими ЕЕС. В умовах сьогодення забезпечення балансу покладено суто на централізовану систему електропостачання. Все ж поступово відбуваються зміни в механізмах функціонування енергоринку України, що спонукають власників ВДЕ працювати за заданим графіком, зокрема введення штрафів за недотримання заявленого добового графіка генерування. Для роботи за заданим графіком потрібно, перш за все, дослідити потенційні можливості джерел генерування

щодо покриття графіків навантаження. На основі статистичних даних з генерування, якщо станція вже експлуатується, або прогнозних щодо вироблення електроенергії, якщо станція ще не введена в експлуатацію, можна отримати вихідну інформацію для визначення потужності резерву, який має підтримуватись для забезпечення балансної надійності РЕМ, або визначення ємності накопичувача.

Задача визначення оптимальної ємності накопичувача ускладнюється тим, що, по-перше, під час її вирішення необхідно враховувати не тільки термін його експлуатації, а й кількість циклів «заряд/розряд», по-друге, забезпечувати відповідні умови експлуатації, критично потрібно дотримуватися температурного режиму, по-третє, контролювати параметр глибини розряду (depth of discharge). На сьогоднішній день подальше нарощування відновлювальних джерел енергії неможливе без використання засобів балансування, а оскільки специфіка генерування ВДЕ полягає в розосередженості по всій території України, то накопичувачі також необхідно встановлювати безпосередньо біля джерел небалансу. Однак станом на сьогоднішній день вартість накопичувача досить висока, тому доцільно буде прорахувати його техніко-економічні характеристики для групи станцій або одного регіону, або тих, що приєднані до однієї підстанції. Такий підхід дозволить зменшити втрати в електричних мережах та підвищити якість електроенергії.

В роботі отримано нове рішення актуальної науково-прикладної задачі підвищення надійності електропостачання, що ґрунтується на подачі живлення від джерела з гарантованим графіком генерування на шини фотоелектричної станції та визначення ємності накопичувача для фотоелектричної станції в умовах впровадження нового ринку електричної енергії.

Проведені дослідження дозволили отримати такі результати:

1. Показано взаємозв'язок показників надійності роботи електричних мереж, а саме: тривалості перерв в електропостачанні зі зростанням генерування ВДЕ. Встановлено, що лише вибір оптимальної схеми та потужностей

відновлювальних джерел енергії дозволяє отримати максимальний ефект від їх функціонування.

2. Запропоновано використання Battery energy storage system (BESS), для подальшого нарощування генерування ВДЕ. Оскільки темпи генерування ВДЕ досить високі, то спільне використання BESS та ВДЕ приведе до зменшення кількості теплових електростанцій, що вже технічно відпрацювали свій технічний ресурс. Більш того, такі системи можна буде використовувати як накопичувач для дотримання графіка генерування ФЕС на добу наперед. Зважаючи на досить великий обсяг капіталізації таких систем, було сформовано цільову функцію, що враховує витрати на будівництво систем акумулювання енергії (CAE), вартість покриття небалансів та зменшення циклу заряд/розряд.

3. Додаткові капіталовкладення в забезпечення резерву для локальних електричних систем мають бути обґрунтовані відповідним техніко-економічним розрахунком. Розроблено метод визначення оптимальної потужності та ємності накопичувача для фотоелектричної станції або їх групи за критерієм мінімуму приведених витрат, що дозволяє компенсувати нестабільність процесу генерування ФЕС і підвищити балансову надійність. Оптимальна ємність накопичувача дозволяє балансувати потужність станції в широкому діапазоні і, відповідно, створюються умови для генерування ФЕС за заявленим на наступну добу графіком.

Показано, що запропонований метод дозволяє отримати низку переваг:

- зменшення витрат на покриття небалансів, викликаних складністю прогнозування генерування ФЕС;
- можливість врахування капітальних витрат на встановлення накопичувача при визначенні небалансів генерування ФЕС;
- підвищення режимної та балансової надійності розподільної мережі, де знаходиться ФЕС.

4. Оскільки електричні мережі енергосистем проектувалися без урахування можливості приєднання розосереджених джерел генерування в них, це, враховуючи також значне спрацювання їх технічного ресурсу, робить

неможливим приєднання ФЕС без втрати надійності таких мереж. Виходячи з вищезазначеного, в роботі запропоновано метод відновлення електропостачання частини електричної мережі за рахунок сумісного використання різнотипних РДЕ, в даному випадку ФЕС та малих ГЕС.

Використовуючи даний метод можна досягти зменшення перерв в електропостачанні на 5%, а також забезпечити дотримання нормативних відхилень напруги під час роботи генерувального обладнання. Запропонований підхід реалізований та переданий для дослідної експлуатації в компанію електропостачальника ТОВ «НЕСС ЕНЕРДЖІ» (довідка про впровадження від 03.09.2019р).

Розроблені у роботі метод та алгоритм визначення ємності накопичувача, що рекомендується для встановлення на фотоелектричні станції, передано для дослідної експлуатації до ТОВ «НЕСС РНД ЦЕНТР» (довідка про впровадження від 20.08.2019 р.).

Результати дисертаційного дослідження впроваджено в навчальний процес Вінницького національного технічного університету (довідка про впровадження від 10.09.2019 р.).

Ключові слова: відновлювальні джерела енергії, фотоелектрична станція, нестабільність, надійність роботи електричної мережі, локальна електрична система, потужність резерву, втрати потужності, мала гідроелектростанція, накопичувач, ємність.

ABSTRACT

Kotylko I. V. Optimization of the Co-utilization of the Divers Renewable Sources of Energy for the Enhancement of the Operation Reliability of the Electric Grids. – Qualifying Scientific Work as a Manuscript.

Dissertation for the Candidate of Science (Engineering) Degree on the Speciality 05.14.02 – «Electric Stations, Grids and Systems».– Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, 2019.

National Plan of actions in the sphere of renewable power generation up to the year 2020 envisages that the share of the renewable generation in the final energy consumption will achieve 11%.

Nowadays Ukraine demonstrates the highest in the world rates of signing contracts for the future connection of the RSE, but this creates great risks for the outdated energy system. The key factor is that according to the information of the National Commission for State Regulation of Energy and Public Utilities (NCSREPU), in the first quarter of 2018, 159.4 MW of generating capacities were put into operation – 54 objects of energy sector (2.4 times exceeds the generating capacities, put into operation during the same period of 2017). Objects of WPS and PVS represent 92% of the generation capacities, put into operation and average single capacity of the energy sector objects is 3 MW. The installed capacity of WPS and PVS in Ukraine as on the middle of 2019 totally is 3653 MW these capacities have minor impact on the electric energy balance. Their deviations from the planned generation are compensated by the power cycling.

In 2017 the number of the issued technical specifications and signed contracts with the company «Ukrenergo», regarding the connection to the high voltage grids of the objects of «green energy» increased more than 30 times by the power index, as compared with 2016. These extremely high rates and such trends remain.

According to the information of the company «Ukrenergo», for the present day the contracts on the connection to the grids of the «green energy» units of 7426 MW (WPS – 4200 MW, PVS – 3226 MW, without taking into account large hydropower stations and pumped storage plants) were signed. However, the unified energy system (UES) can accept only up to 5000 MW of power of the solar and wind stations without the risk of disbalancing and serious changes in its structure.

System operation in the research stresses that solar power plants and wind stations from the point of view of the stable energy supply are not reliable. Deviations from the planned daily curve is more than 450 MW at the installed capacity of 1217 MW. One more specific feature, regarding the installation of the renewable sources of energy is their non-uniform distributions on the territory of Ukraine. Thus, availability

of one powerful source of up to 3 MW or several less powerful up to 0.5 MW sources, connected to one substation on the distributed electric grid (DEG) give the possibility to consider DEG as the local electric system (LES).

Especially urgent for the distributed electric grids is the problem of the reliable and sustainable energy supply. According to the decision of National Commission for State Regulation of Energy and Public Utilities (NCSREPU) of 12.06.2018 «On the approval of the procedures of the provision of the standards of energy supply quality and consumers compensation in case of the standards inobservance», the index is determined that qualitatively characterizes the level of the electric grid reliable operation.

But taking into consideration the rates of RSE generation capacities increase, in particular PVS, it is expedient to carry out the analysis of the defined indices change in the conditions of its increase.

Unstable charter of the renewable sources of energy operation influences the operation modes of the electric grids. Instability of PVS generation is compensated by the power, supplied to DEG from the energy system. That is why, the conditions of DEG mode balancing influence the operation modes of electric energy system. In present conditions the centralized system of energy supply is responsible for the balance provision. However, changes in the mechanism of the energy market of Ukraine operation gradually take place, these changes make the owners of RSE work according to the preset schedule, in particular, introduction of penalties for inobservance of the contracted daily generation schedule. For the operation according to the preset schedule, first of all, it is necessary to study the potential possibilities of the generation sources regarding the coverage of the load curve.

On the base of the statistic generation data, if the power plant operates, or on the base of the forecast data of energy generation if the power plant is not put into operation, the output information for the determination of the reserve power which must be maintained to provide the balance reliability of DEG or determination of the storage capacity, can be obtained.

The problem of determining the optimal capacity of the drive is complicated by the fact that, first, when solving it, it is necessary to take into account not only its life cycle but the number of charge / discharge cycles; third, to control the depth of discharge parameter. To date, the further increase of renewable energy sources is impossible without the use of balancing tools, and since the specificity of generating renewable energy sources is dispersed throughout the territory of Ukraine, so the storage also needs to be installed directly near the imbalance sources. However, as of today, the cost of the drive is quite high, so it would be advisable to calculate its technical and economic characteristics for a group of stations in one region, or connected to a single substation. This approach will reduce the losses in the electricity grids and improve the quality of electricity.

In the given research new solution of the actual scientific-applied problem, aimed at the improvement of energy supply reliability can be obtained, this solution is based on the transmission of the supply from the source with the ensnared generation curve on the buses of the photovoltaic power plant and determination of the storage unit capacity for the photovoltaic power plant in the conditions of the introduction of new energy market.

The research, carried out, enabled to obtain the following results:

1. The interconnection of the electric grids operation reliability indexes, namely duration of the intervals in energy supply with the growth of RSE generation is shown.

It is established that only the selection of optimal circuit and power of the renewable sources of energy allows to obtain maximal effect as result of their operation.

2. It is suggested to use Battery energy storage system (BESS) for futher generation increase of RSE. As the generation rates of RSE are rather high, co-usage of BESS and RSE will lead to the decrease of the number of thermal power plans, which have exhausted their life span. Also such systems can be used as the storage units for the maintaining of the generation schedule of PVP a day ahead. Taking into account rather high volume of capitalization of such systems, the efficiently function,

that takes into consideration the expenses for the construction of SES (system of energy storage), cost of the imbalance covering and reduction of the charge/discharge cycle, was formulated.

3. Additional capital investments in the provision of the reserve of the local electric systems must be substantiated by the corresponding technical-economic calculation. Method of determination of the optimal power and capacity of the storage battery for the photovoltaic station or their groups by the criterion of the minimum corrected expenses of the station owner, this enables to compensate the instability of PVP generation process and increase the balance reliability, is developed.

Optimally determined capacity of the storage battery enables to balance the power of the station in the wide range and, correspondingly, the conditions for PVP generation according to the schedule, contracted the day before. It is shown, that the suggested method enables to obtain a number of advantages:

- reduction of the expenses of PVP owner for covering the imbalances caused by the complexity to forecast PVP generation;
- possibility to take into account the capital spendings for the installation of the storage battery while determining the imbalances of PVP generation;
- increase of the mode and balance reliability of the distribution grid, where PVP is located.

4. As the electric grids of the energy systems were designed without taking into consideration the possibilities of the connection of the distributed generation sources and considerable wear of the equipment makes impossible the connection of PVP without losses of the reliability of such grids. Proceeding from the above-mentioned, the research suggests the method of the energy supply restoration of the part of the electric grid at the expense of co-utilization of the divers RSE, in the given case PVP and small hydropower station.

Applying the given method, the intervals in energy supply can be reduced by 5% and provide the observance of the normative voltage deviations during operation of the generating equipment. The suggested approach is realised and proposed for the

test operation to the company of energy supplier «Kness Energy Ltd.» (implementation certificate of 03.09.2019).

Method and the algorithm of the determination of the storage battery capacity, developed in the research, recommended for the installation at the photovoltaic power plant, are proposed for test operation to «Kness PND Center Ltd.» (implementation certificate of 20.08.2019).

The results of the dissertation research are implemented in the education process of Vinnitsia National Technical University (implementation certificate of 10.09.2019).

Key words: Renewable sources of energy, photovoltaic power plant, instability, reliability of the electric grid operation, local electric system, power of the reserve, power loss, small hydropower station, storage battery, capacity.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

[1] P. Lezhnyuk, S. Kravchuk, I. Kotylko, N. Sobchuk, and I. Hunko, «Modeling of Electrical Supply Restoration in Local Electrical Systems after Loss of Centralized Power», *Proceedings of the 2018 IEEE 3rd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS)*, Kharkiv, 2018, pp. 55-58 doi: 10.1109/IEPS.2018.8559583.

[2] S. Kravchuk, and I. Kotylko, «Matching of Renewable Source of Energy Generation Graphs and Electrical Load in Distribution Electric Grid», *2017 IEEE International Young Scientists Forum on Applied Physics and Engineering (YSF)*, Lviv, pp. 28-31, 2017. doi: 10.1109/YSF.2017.8126641.

[3] П. Д. Лежнюк, В. О. Комар, С. В. Кравчук, та І. В. Котилко, «Вплив розосередженого генерування на надійність роботи електричних мереж», *Вісник*

НТУ «ХПІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях, Харків: НТУ «ХПІ», № 45 (1321), с. 25-31, 2018. doi:10.20998/2413-4295.2018.45.04.

[4] П. Д. Лежнюк, В. О. Комар, С. В. Кравчук, І. В. Котилко, та І. О. Прокопенко, «Оцінювання якості електропостачання в локальних електричних системах з різнотипними відновлювальними джерелами енергії», *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка, Серія: Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України*, № 195, с. 23-25, 2018.

[5] П. Д. Лежнюк, І. О. Гунько, Ю. В. Малогулко, І. В. Котилко, та Л. Р. Крот, «Моделювання сумісної роботи розосереджених джерел електроенергії та централізованого електропостачання», *Вісник чернігівського національного технологічного університету. Серія: Технічні науки та технології*, № 2 (12), с. 189-195, 2018.

[6] П. Д. Лежнюк, В. В. Кулик, О. А. Ковальчук, та І. В. Котилко, «Оптимізація режимів електричних мереж з відновлюваними джерелами енергії з використанням Smart Grid технологій», *Енергетика та комп'ютерно-інтегровані технології в АПК*, № 2 (2), с. 17-20, 2014.

[7] П. Д. Лежнюк, І. В. Котилко, та С. В. Кравчук, «Відновлення електропостачання в локальних електричних системах з ВДЕ при втраті централізованого живлення», у *Матеріалах XIV Міжнародної науково-технічної конференції «Контроль і управління в складних системах (КУСС-2018)»*, м. Вінниця, 2018 р. [online]. Доступно : <http://ir.lib.vntu.edu.ua/handle/123456789/22729>.

[8] І. В. Котилко, та С. В. Кравчук, «Відновлення електропостачання в локальних електричних системах при втраті централізованого живлення», у *Матеріалах XLVII науково-технічної конференції підрозділів ВНТУ*, м. Вінниця, 2018 р. [online]. Доступно : <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-feeem/all-feeem-2018/paper/view/5095>.

[9] П. Д. Лежнюк, С. В. Кравчук, І. В. Котилко, та А. С. Кульматицька, «Нормування показників надійності роботи локальних електричних систем в задачах відновлення їх електропостачання» у *Матеріалах міжнародного симпозіуму «Проблеми електроенергетики, електротехніки та електромеханіки»*, м. Харків, 2018 р.

[10] П. Д. Лежнюк, В. В. Кулик, та І. В. Котилко «Самоорганізація режимів локальних електричних систем з комбінованим електропостачанням», *Енергетика та електрифікація*, 2015. – № 12. – с. 27-29.

[11] П. Д. Лежнюк, С. В. Кравчук, та І. В. Котилко, «Підвищення надійності електричних мереж з використанням відновлюваних джерел енергії», у *Матеріалах XX Міжнародної науково-практичної конференції "Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті"*, м. Київ, 2019 р. – с. 98-102.

[12] П. Д. Лежнюк, С. В. Кравчук, І. В. Котилко, та А. Б. Урода, «Підвищення енергоефективності локальних електричних систем за рахунок сумісного використання різнотипних розосереджених джерел енергії», у *Матеріалах міжнародного симпозіуму «Проблеми електроенергетики, електротехніки та електромеханіки»*, м. Харків, 2018 р.

ЗМІСТ

РОЗДІЛ 1 ОЦІНЮВАННЯ ВПЛИВУ ГЕНЕРУВАННЯ ВІДНОВЛЮВАЛЬНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ НА НАДІЙНІСТЬ РОБОТИ РОЗПОДІЛЬНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ	25
1.1 Аналіз нормативних актів, що регламентують роботу ВДЕ в електричних мережах ОЕС України.....	Error! Bookmark not defined.
1.1.1 Аналіз існуючих показників оцінювання надійності роботи електричних мереж.....	Error! Bookmark not defined.
1.1.2. Аналіз показників якості електричної енергії мереж з ВДЕ	Error! Bookmark not defined.
1.2 Оцінювання впливу динаміки зростання ВДЕ на показники надійності роботи електричних мереж	Error! Bookmark not defined.
1.3 Аналіз технічного стану електричних мереж України енергосистем з огляду на можливість приєднання ВДЕ	Error! Bookmark not defined.
1.4 Оцінювання та підвищення надійності електропостачання електричних мереж з відновлювальними джерелами енергії.....	Error! Bookmark not defined.
1.5 Висновки до розділу 1. Задачі наукового дослідження.....	Error! Bookmark not defined.
РОЗДІЛ 2 БАЛАНСУВАННЯ РЕЖИМІВ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ ОЕС УКРАЇНИ.....	Error! Bookmark not defined.

- 2.1 Передумови нарощування темпів та обсягів впровадження відновлювальних джерел енергії в мережі ОЕС України **Error! Bookmark not defined.**
- 2.2 Розробка моделі визначення ємності накопичувача в умовах зростання генерування ФЕС..... **Error! Bookmark not defined.**
- 2.3 Оцінювання небалансів, викликаних прогнозуванням генерування ФЕС **Error! Bookmark not defined.**
- 2.3.1 Встановлення відповідальності за небаланси, викликані генеруванням ФЕС **Error! Bookmark not defined.**
- 2.3.2 Розрахунок плати за небаланси електроенергії **Error! Bookmark not defined.**
- 2.4 Обґрунтування ємності накопичувача для балансування групи станцій..... **Error! Bookmark not defined.**
- 2.5 Визначення ємності накопичувача для групи фотоелектричних станцій..... **Error! Bookmark not defined.**
- 2.6 Висновки до розділу 2 **Error! Bookmark not defined.**
- РОЗДІЛ 3 АЛГОРИТМІЗАЦІЯ МЕТОДІВ ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ РОБОТИ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ З ВІДНОВЛЮВАЛЬНИМИ ДЖЕРЕЛАМИ ЕНЕРГІЇ..... **Error! Bookmark not defined.**
- 3.1 Проблеми балансування електричних мереж з відновлювальними джерелами енергії..... **Error! Bookmark not defined.**
- 3.2 Алгоритм визначення обсягів та вартостей небалансів ФЕС **Error! Bookmark not defined.**
- 3.3 Алгоритм визначення ємності накопичувача для групи станцій електричної мережі..... **Error! Bookmark not defined.**
- 3.4 Підвищення надійності роботи розподільних електричних мереж **Error! Bookmark not defined.**
- 3.4.1 Алгоритм відновлення електропостачання споживачі розподільних електричних мереж..... **Error! Bookmark not defined.**
- 3.5 Висновки до розділу 3 **Error! Bookmark not defined.**
- РОЗДІЛ 4 ОПТИМІЗАЦІЯ СУМІСНОГО ВИКОРИСТАННЯ РІЗНОТИПНИХ ВІДНОВЛЮВАЛЬНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ В ЗАДАЧАХ ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ **Error! Bookmark not defined.**
- 4.1 Розрахунок відповідальності за небаланси викликані генеруванням ФЕС **Error! Bookmark not defined.**

4.2	Визначення ємності накопичувача для зменшення небалансів генерування ФЕС.....	Error! Bookmark not defined.
4.3	Підвищення надійності електричних мереж з відновлювальними джерелами енергії.....	Error! Bookmark not defined.
4.3.1	Відновлення електропостачання споживачам електричної мережі з різномісними розосередженими джерелами генерування.....	Error! Bookmark not defined.
4.4	Висновки до розділу 4.....	Error! Bookmark not defined.
	ВИСНОВКИ.....	125
	СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	127
	ДОДАТКИ.....	141
	Додаток А Результати розрахунку усталеного режиму фрагмента схеми Ямпільських електричних мереж.....	142
	Додаток Б Результати розрахунку режиму відновленого електропостачання фрагмента схеми Ямпільських електричних мереж.....	151
	Додаток В Довідки про впровадження результатів досліджень.....	167
	Додаток Г Список публікацій за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації.....	170

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

- EUE – Expected Unserved Energy;
- LOEE – Loss of Energy Expectation;
- LOLE – Loss of Load Expectation;
- LOLP – Loss of Load Probability;
- АЕС – атомна електрична станція;
- АСКОЕ – автоматизована система комерційного обліку електроенергії;
- ВДЕ – відновлювальні джерела електроенергії;
- ВЕС – вітрова електрична станція;
- ЕЕС – електроенергетична система;

- ЕМ – електрична мережа;
- ЛЕП – лінія електропередачі;
- ЛЕС – локальна електрична система;
- ОК – оперативно-інформаційний комплекс;
- ОСР – оператор системи розподілу
- ПБН – показники балансової надійності;
- ПК – програмний комплекс;
- РГ – розосереджене генерування;
- РДЕ – розосереджені джерела енергії;
- РЕМ – розподільні електричні мережі;
- РП – розподільний пристрій;
- САЕ – систем акумулювання енергії
- СЕС – сонячна електрична станція;
- ТЕС – теплова електрична станція;
- ТП – трансформаторна підстанція;
- ФЕС – фотоелектрична станція

ВСТУП

Обґрунтування вибору теми дослідження. Вітроелектричні станції (ВЕС) та фотоелектричні станції (ФЕС) складають на сьогодні 92% введених потужностей, а середня одинична потужність введених в цей час об'єктів електроенергетики складає 3 МВт. Встановлена потужність ВЕС та ФЕС в Україні станом на кінець 2019 року сумарно складає 3653 МВт. Серед іншого очікується, що розбудова відновлювальних джерел енергії (ВДЕ) в електричних мережах може суттєво покращити їх енергоефективність – підвищити надійність, зменшити втрати електроенергії, покращити її якість. Однак генерування ВДЕ впливає на баланс електроенергії в системі, а відхилення від

прогнозованого графіка генерації вимушені компенсувати маневровими потужностями.

Нестабільний характер роботи відновлювальних джерел енергії впливає на режими роботи електричних мереж. Оскільки нестабільність ВДЕ компенсується потужністю, яка надходить в РЕМ з енергосистеми, то це впливає і на режими ЕЕС. В умовах сьогодення забезпечення балансу покладено суто на централізовану систему електропостачання. Проте поступово відбуваються зміни в механізмах функціонування енергоринку України, що спонукають ВДЕ працювати за заданим графіком, зокрема введення штрафів за недотримання заявленого добового графіка генерування. Для роботи за заданим графіком потрібно дослідити потенційні можливості джерел генерування щодо покриття графіків навантаження.

Задача визначення оптимальної ємності накопичувача ускладнюється тим, що, по-перше, під час її вирішення необхідно враховувати не тільки термін його експлуатації, а й кількість циклів «заряд/розряд», по-друге, забезпечувати відповідні умови експлуатації, критично необхідно дотримуватися температурного режиму, по-третє, контролювати параметр глибини розряду (depth of discharge). На сьогоднішній день подальше нарощування відновлювальних джерел енергії неможливе без використання засобів балансування, а оскільки специфіка генерування ВДЕ полягає в розосередженості по всій території України, то накопичувачі також необхідно встановлювати безпосередньо біля джерел небалансу.

Іншою складовою комплексного завдання інтеграції відновлювальних джерел енергії є розроблення методів підвищення надійності роботи електричних мереж зі значною мірою впровадження таких джерел. Сумісне використання різнотипних відновлювальних джерел енергії дозволяє підвищити надійність електропостачання споживачів мережі та зменшити обсяги недовідпущеної електроенергії.

Проблемою оптимального інтегрування відновлювальних джерел енергії в електричні мережі енергосистем активно займаються в Інституті

електродинаміки НАНУ [1]–[2], Інституті відновлюваної енергетики НАНУ [3]–[6], НТУУ «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського» [7]–[9], Вінницькому національному технічному університеті (ВНТУ) [10]–[14], Національному університеті біоресурсів та природокористування [15], Національному технічному університеті «Львівська політехніка» [16], Луцькому національному технічному університеті [17]–[19] та інші [20]–[26].

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертація виконана в плані наукових досліджень, проведених кафедрою електричних станцій та систем ВНТУ за держбюджетними темами «Інтелектуалізація електроенергетичних систем з відновлюваними джерелами енергії на основі принципу Гамільтона-Остроградського» (№ держреєстрації 0115U001120), «Інтегрування нетрадиційних та відновлюваних джерел енергії в електричні мережі для підвищення їх енергоефективності з використанням SMART GRID технологій» (№ держреєстрації 018U000206) та теми за господарчим договором з Подільським енергоконсалтингом «Програмно-апаратний комплекс прогнозування режимів функціонування фотовольтаїчних електричних станцій». Автор брала участь у виконанні вищевказаних робіт як виконавець.

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є підвищення надійності електричних мереж з різнотипними відновлювальними джерелами енергії за рахунок визначення оптимальних схем приєднання до мережі та обсягів балансувальних потужностей.

Відповідно до вказаної в роботі мети вирішуються такі основні задачі:

- аналіз існуючих показників оцінювання надійності роботи електричних мереж;
- оцінювання впливу генерування відновлювальних джерел енергії на показники надійності роботи електричних мереж;
- розроблення методу підвищення надійності електропостачання, що ґрунтується на подачі живлення від джерела з гарантованим графіком генерування на шини фотоелектричної станції;
- обґрунтування граничних потужностей приєднання відновлювальних

джерел енергії, з огляду на забезпечення балансової надійності електричних мереж;

- розробка методу та обґрунтування ємності накопичувача для фотоелектричної станції в умовах впровадження нового ринку електричної енергії;

- визначення обсягів витрат власників відновлювальних джерел енергії на покриття штрафів за небаланси, що викликані неточністю прогнозування;

- виконання алгоритмічної реалізації розроблених методів та перевірка їх ефективності.

Об'єктом дослідження дисертаційної роботи є режими роботи електричних мереж з різнотипними відновлювальними джерелами енергії.

Предметом дослідження є методи та засоби підвищення надійності роботи електричних мереж з різнотипними відновлювальними джерелами енергії.

Методи дослідження. Для розроблення методів визначення оптимальної встановленої потужності та оптимізації режимів генерування ВДЕ в локальній електричній системі використані методи математичного моделювання та чисельні методи. Статистичні методи оброблення інформації використано для аналізу результатів розрахунків. Методи лінійного та нелінійного програмування застосовано для формування алгоритмів пошуку оптимальних розв'язків поставлених задач. Усталені режими моделюються та аналізуються з використанням методу вузлових напруг. Для розроблення алгоритмів і програм аналізу режимів ВДЕ та їх впливу на режими роботи ЛЕС, а також формування алгоритмів оптимізації транспортування електроенергії в ЛЕС використовувалися: матрична алгебра, теорія графів, декомпозиція та об'єктно-орієнтований аналіз.

Наукова новизна отриманих результатів полягає у тому, що:

- вперше запропоновано метод підвищення надійності роботи розподільних електричних мереж з різнотипними відновлювальними джерелами енергії, що ґрунтується на подачі живлення від джерела з гарантованим

графіком генерування на шини фотоелектричної станції;

– вдосконалено метод визначення ємності накопичувача енергії фотоелектричної станції для покриття небалансів з застосуванням нейро-нечіткого моделювання, що дозволяє зменшити неточність прогнозування графіка генерування на добу наперед;

– на основі аналізу сумарних графіків генерування та навантаження в ОЕС України встановлено залежності зменшення теплової генерації та нарощування потужностей систем акумулювання енергії для збільшення частки фотоелектричних станцій в загальному балансі потужностей.

Практичне значення отриманих результатів. Практична цінність роботи полягає в тому, що на підставі результатів виконаних досліджень розв’язана задача підвищення надійності електричних мереж з відновлювальними джерелами енергії, що полягає у визначенні оптимальних схем приєднання до мережі та обсягів балансувальних потужностей.

За результатами проведених теоретичних досліджень розроблено метод відновлення електропостачання споживачів електричної мережі та виконано його алгоритмічну реалізацію, що дозволяє покращити показник середньої тривалості перерв в електропостачанні. Використовуючи даний метод, можна досягти зменшення перерв в електропостачанні на 5%, а також забезпечити дотримання нормативних відхилень напруги в процесі генерування електроенергії. Запропонований підхід реалізовано та передано для дослідної експлуатації в ТОВ «НЕСС ЕНЕРДЖІ» (довідка про впровадження від 03.09.2019 р.). Розроблені у роботі метод та алгоритм визначення ємності накопичувача, що рекомендується для встановлення на фотоелектричні станції, передано для дослідної експлуатації до ТОВ «НЕСС РНД ЦЕНТР» (довідка про впровадження від 20.08.2019 р.). Результати дисертаційного дослідження впроваджено в навчальний процес Вінницького національного технічного університету (довідка про впровадження від 10.09.2019 р.).

Особистий внесок здобувача. Всі наукові положення, які є основним змістом дисертаційної роботи, розроблено та обґрунтовано здобувачем

особисто. У роботах, що опубліковані у співавторстві, внесок автора такий. В [27] запропоновано метод та у [28] алгоритм підвищення надійності роботи розподільних електричних мереж з різнотипними РДЕ, що ґрунтується на подачі живлення від джерела з гарантованим графіком генерування на шини фотоелектричної станції. В [29] запропоновано алгоритм методу відновлення електропостачання споживачів розподільних електричних мереж та виконано оцінювання якості електропостачання електричних мереж з розосередженим генеруванням. В [30] проведено оцінювання впливу генерування розосереджених джерел енергії на надійність роботи електричних мереж, розглянуто основні показники надійності роботи електричної мережі. Проведено моделювання сумісної роботи різнотипних розосереджених джерел генерування з огляду на можливість підвищення надійності роботи електричної мережі в [31]. В [32] запропоновано метод оптимізації режимів електричних мереж, а у [33] проаналізовано вплив генерування фотоелектричних станцій на перехідні режими роботи електромереж з ВДЕ. Проаналізовано показники оцінювання надійності роботи електричних мереж зі значною часткою генерування відновлювальних джерел енергії [34], а в [35] їх пронормовано. В [36] запропоновано метод самоорганізації режимів електричних мереж. Метод оцінювання надійності електропостачання розглянуто в [37], а в [38] – метод підвищення енергоефективності локальних електричних систем за рахунок сумісного використання різнотипних розосереджених джерел енергії.

Результати теоретичних досліджень, що викладені у [27]–[38], були отримані у Вінницькому національному технічному університеті.

Апробація матеріалів дисертації. Основні положення роботи та її результати доповідались, обговорювались та були схвалені на таких науково-технічних конференціях та семінарах:

XX Міжнародній науково-практичній конференції «Відновлювальна енергетика та енергоефективність у XXI столітті» (м. Київ, 2018 р.);

IV Міжнародній науково-технічній конференції «Оптимальне керування електроустановками ОКЕУ-2017» (м. Вінниця, 2018 р.);

XIV Міжнародній конференції «Контроль і управління в складних системах» (м. Вінниця, 2018 р.);

VII Міжнародній науково-технічній конференції «Підвищення рівня ефективності енергоспоживання в електротехнічних пристроях і системах» (м. Луцьк, 2018 р.);

V Науково-практичній конференції «Сучасні методи аналізу усталених режимів електричних мереж та стійкості електроенергетичних систем. Новітні досягнення у проведенні тренажерної підготовки оперативно-диспетчерського персоналу» (Славське, 2018 р.);

2018 IEEE 3rd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems;

IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering;

XX Jubilee International Conference 2019 «Computational Problems of Electrical Engineering»;

Міжнародному симпозиумі «Проблеми електроенергетики, електротехніки та електромеханіки» SIEMA 2018.

Публікації. За матеріалами дисертаційної роботи опубліковано 12 робіт, з яких 6 статей у наукових фахових виданнях, з них стаття 1 проіндексована в базі даних Scopus та 1 стаття у міжнародному періодичному виданні, 6 публікацій у збірниках матеріалів міжнародних науково-технічних конференцій.

Структура та обсяг роботи. Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел (108 найменувань) і 4 додатків. Основний зміст викладено на 109 сторінках друкованого тексту, містить 48 рисунків, 10 таблиць. Загальний обсяг роботи – 172 сторінки.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- [1] О. В. Кириленко, та А. В. Праховник, Енергетика сталого розвитку: виклики та шляхи побудови. *Праці Інституту електродинаміки НАН України. Спеціальний випуск.* с. 10-16, 2010.
- [2] О. В. Кириленко, В. В. Павловський, та Л. М. Лук'яненко, Технічні аспекти впровадження джерел розподіленої генерації в електричних мережах. *Технічна електродинаміка.* № 1, с. 46-53, 2011.
- [3] М. П. Кузнецов, та О. В. Лисенко, «Можливості короткотермінового прогнозування сонячної енергії», *Відновлювана енергетика.* № 1, с. 25-31, 2017.
- [4] П. Ф. Васько, та Ю. А. Вихорев, «Актуальные вопросы развития малой гидроэнергетики в Украине на современном этапе», *Відновлювана енергетика.* № 3(30), с. 60-65, 2012. ISSN 1919 – 8058
- [5] С. О. Кудря, *Нетрадиційні та відновлювані джерела енергії.* Київ, Україна: НТУУ «КПІ», 2012. 492 с. ISBN 978-966-622-521-7
- [6] А. Ф. Жаркин, В. А. Попов, Сахрагард Саид Банузаде и др., Многокритериальная оценка альтернативных вариантов интеграции

- источников распределённой генерации в распределительные сети. *Электронное моделирование*. Т. 38, № 1, с. 99-112, 2016.
- [7] В. А. Попов и др., Учёт фактора надёжности электроснабжения при комплексной оценке вариантов интеграции источников распределённой генерации в распределительные сети, *Енергетика: економіка, технології, екологія*, № 4, с. 39-43, 2015.
- [8] Б. С. Стогній, О. В. Кириленко, А. В. Праховник, та С. П. Денисюк, «Еволюція інтелектуальних електричних мереж та їхні перспективи в Україні», *Техн. електродинаміка*, № 5, с. 52-67, 2011. ISSN 1607-7970.
- [9] С. П. Денисюк, та Д. С. Горенко, «Аналіз проблем впровадження віртуальних електростанцій», *Енергетика: економіка, технології, екологія : науковий журнал*, № 2 (44), с. 25-33, 2016.
- [10] П. Д. Лежнюк, В. О. Комар, та С. В. Кравчук, «Визначення оптимальної потужності резерву для забезпечення балансової надійності локальної електричної системи», *Вісник НТУ «ХПІ»*, № 42 (1214), с. 69-75, 2016, doi: 10.20998/2413-4295.2016.42.11.
- [11] 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.
- [12] В. В. Кулик, О. Б. Бурикін, та Ю. В. Малогулко, «Дослідження ефективності сумісної експлуатації локальних електричних мереж з ВДЕ та системами централізованого електропостачання», *Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут»*. Серія «Гірництво. Електрифікація та автоматизація гірничих робіт», 2014. Вип. 25, с. 113-120, 2014, ISSN 2079-5688.
- [13] П. Д. Лежнюк, В. О. Комар, та Д. С. Собчук, «Аналіз впливу розосередженого генерування на режим розподільних електричних систем», *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. № 6, с. 45-47, 2013, ISSN 1997-9266.

- [14] P. D Lezhniuk et al., Optimal integration of photoelectric stations in electric networks, monograph. LAP LAMBERT Academic Publishing. pp. 220, 2019, ISBN-13 – 978-620-0-08225-1.
- [15] Ю. І. Тугай, В. В. Козирський, О. В. Гай, та В. М. Бодунов, «Інтеграція поновлюваних джерел енергії в розподільні електричні мережі сільських регіонів», *Технічна електродинаміка*, № 5, с. 63-67. 2911, ISSN 1607-7970
- [16] Ю. О. Варецький, В. М. Горбань, Я. С. Пазина, Зміни напруги в електричній мікромережі з гібридною електростанцією. *Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Електроенергетичні і електромеханічні системи*, № 840, с. 17-23, 2016.
- [17] Л. Н. Добровольська, В. І. Волинець, Д. С. Собчук, та В. В. Черкашина, *Електричні мережі з відновлюваними джерелами енергії*. Луцьк, Україна: РВВ Луцького НТУ, 2016.
- [18] Д. С. Собчук «Використання нетрадиційних джерел енергії в електроенергетичних системах для підвищення надійності та якості електропостачання», *Наукові нотатки. Міжвузівський збірник*, Вип. 40. С. 261-265, 2013.
- [19] Л. В. Давиденко, Н. В. Коменда, Т. І. Коменда. *Управління та контроль енергоспоживання*. Луцьк, Україна: Луцький НТУ, 2015, ISBN 978–617–672–087–4.
- [20] Walid El-Khattam, Kankar Bhattacharya, Yasser Hegazy, and M. M. A. Salama «Optimal Investment Planning for Distributed Generation in a Competitive Electricity Market», *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 19, no. 3, pp. 1674-1684, August 2004. Analytical Approaches for Optimal Placement of Distributed Generation Sources in Power Systems.
- [21] N. S. Rau, and Y.-H. Wan. «Optimum location of resources in distributed planning», *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 9, pp. 2014-2020, Nov. 1994.

- [22] Caisheng Wang, and M. Hashem Nehrir «An Analytical Method for DG Placements Considering Reliability Improvements», *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 19, no. 4, pp. 2068-2076, November 2004.
- [23] Hamid Falaghi, and Mahmood-Reza Haghifam «ACO Based Algorithm for Distributed Generation Sources Allocation and Sizing in Distribution Systems», *PowerTech*, pp. 555-560, 2007.
- [24] Víctor H. Méndez Quezada, Juan Rivier Abbad, and Tomás Gómez San Román «Assessment of Energy Distribution Losses for Increasing Penetration of Distributed Generation», *IEEE Transactions on power systems*, vol. 21, no. 2, pp.533-540, May 2006.
- [25] Seyed Mohammad Hossein Nabavi, Somayeh Hajforoosh, and Mohammad A. S. Masoum, «Placement and Sizing of Distributed Generation Units for Congestion Management and Improvement of Voltage Profile using Particle Swarm Optimization», *IEEE Transactions on Power Systems*, 2011.
- [26] Andrew Keane, Luis (Nando) F. Ochoa, Eknath Vittal, Chris J. Dent, and Gareth P. Harrison «Enhanced Utilization of Voltage Control Resources With Distributed Generation», *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 26, no. 1, pp. 252-260, February 2011.
- [27] P. Lezhnyuk, S. Kravchuk, I. Kotylko, N. Sobchuk, and I. Hunko, «Modeling of electrical supply restoration in local electrical systems after loss of centralized power», in *3rd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems*, IEPS 2018, Proceedings, 10-14 Sept. 2018, , DOI: 10.1109/IEPS.2018.8559583.
- [28] П. Д. Лежнюк, В. О. Комар, С. В. Кравчук, та І. В. Котилко «Вплив розосередженого генерування на надійність роботи електричних мереж», *Вісник НТУ «ХПІ»*, Серія: Нові рішення в сучасних технологіях, № 45 (1321), с. 25-31, 2018, doi:10.20998/2413-4295.2018.45.04.
- [29] П. Д. Лежнюк, В. О. Комар, С. В. Кравчук, І. В. Котилко, та І. О. Прокопенко «Оцінювання якості електропостачання в локальних електричних системах з різнотипними відновлювальними джерелами

- енергії», *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. Серія: Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України*, № 195, с. 23-25, 2018.
- [30] П. Д. Лежнюк, І. О. Гунько, Ю. В. Малогулко, І. В. Котилко, та Л. Р. Крот «Моделювання сумісної роботи розосереджених джерел електроенергії та централізованого електропостачання», *Вісник Чернігівського національного технологічного університету. Серія: Технічні науки та технології*, № 2(12), с. 189-195, 2018.
- [31] П. Д. Лежнюк, В. В. Кулик, О. А. Ковальчук, та І. В. Котилко, «Оптимізація режимів електричних мереж з відновлюваними джерелами енергії з використанням smart grid технологій», *Енергетика та комп'ютерно-інтегровані технології в АПК*, № 2 (2), с. 17-20, 2014.
- [32] П. Д. Лежнюк, В. В. Кулик, та І. В. Котилко, «Самоорганізація режимів локальних електричних систем з комбінованим електропостачанням», *Енергетика та електрифікація*, № 12, с. 27-29, 2015.
- [33] S. Kravchuk, and I. Kotylo, «Matching of Renewable Source of Energy Generation Graphs and Electrical Load in Distribution Electric Grid», in *International Young Scientists Forum on Applied Physics and Engineering (YSF)*, Lviv, 2017, pp. 28-31. doi: 10.1109/YSF.2017.8126641
- [34] П. Д. Лежнюк, І. В. Котилко, та С. В. Кравчук «Відновлення електропостачання в локальних електричних системах з ВДЕ при втраті централізованого живлення», *Матеріали XIV міжнародної конференції «Контроль і управління в складних системах (КУСС-2018)»* м. Вінниця, 15-17 жовтня 2018 р. [Електронний ресурс]. Доступно: <http://ir.lib.vntu.edu.ua/handle/123456789/22729>.
- [35] І. В. Котилко І. В. «Відновлення електропостачання в локальних електричних системах при втраті централізованого живлення», *Матеріали XLVII науково-технічної конференції підрозділів ВНТУ, Вінниця, 14-23 березня 2018 р.* [Електронний ресурс]. Доступно:

- <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-feeem/all-feeem-2018/paper/view/5095>.
- [36] П. Д. Лежнюк, С. В. Кравчук, та І. В. Котилко. «Підвищення надійності електричних мереж з використанням відновлюваних джерел енергії», *Матеріали XX Міжнародної науково-практичної конференції «Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті»*, Київ, 2019, с. 98-102.
- [37] П. Д. Лежнюк, С. В. Кравчук, І. В. Котилко, та А. С. Кульматицька, «Нормування показників надійності роботи локальних електричних систем в задачах відновлення їх електропостачання», *на Міжнародному симпозіумі «Проблеми електроенергетики, електротехніки та електромеханіки» SIEMA 2018*, Харків, 2018, с.
- [38] П. Д. Лежнюк, с. В. Кравчук, І. В. Котилко, та А. Б. Урода, «Підвищення енергоефективності локальних електричних систем за рахунок сумісного використання різнотипних розосереджених джерел енергії», *на Міжнародному симпозіумі «Проблеми електроенергетики, електротехніки та електромеханіки» SIEMA 2018*, Харків, 2018, с.
- [39] Постанова Кабінету Міністрів України «Про Національний план дій з відновлюваної енергетики на період до 2020 року» від 1 жовтня 2014 р. № 902-р.
- [40] Постанова НКРЕКП «Про затвердження Порядку забезпечення стандартів якості електропостачання та надання компенсацій споживачам за їх недотримання» від 12.06.2018.
- [41] Постанова НКРЕКП № 310 «Про затвердження кодексу систем розподілу» від 14.03.2018.
- [42] Постанова НКРЕКП № 309 «Про затвердження кодексу систем передачі» від 14.03.2018.
- [43] Про ринок електричної енергії: Закон України від 13.04.2017 р. № 2019-VIII. URL: <http://zakon3.rada.gov.ua/laws/show/2019-19>.

- [44] Постанова НКРЕКП № 375 «Про затвердження Порядку забезпечення стандартів якості електропостачання та надання компенсацій споживачам за їх недотримання» від 12.06.2018.
- [45] O. V. Kyrylenko, R. Strzelecki, S. P. Denysiuk, and D. G. Derevianko, «Main features of the stability and reliability enhancement of electricity grid with DG in Ukraine based on IEEE standards», *Технічна електродинаміка*, № 6, с. 46-50, 2013.
- [46] О. М. Закладний, О. О. Закладний, «Сучасні методи регулювання якості електроенергії», *Промелектро*, № 2, с. 25-30, 2007.
- [47] Л. И. Зеленкова, «Мониторинг качества электрической энергии в аспекте обеспечения энергетической безопасности», *Электрика*, № 4, с. 24-28, 2007.
- [48] European standard EN 50160 Voltage characteristics of electricity supplied by public distribution systems, CENELEC TC 8X, 2006.
- [49] Y. Alinejad-Beromi, M. Sedighizadeh, M. Sadighi "A Particle Swarm Optimization for Siting and Sizing of Distributed Generation in Distribution Network to Improve Voltage Profile and Reduce THD and Losses".
- [50] Постанова НКРЕКП № 311 «Про затвердження Кодексу комерційного обліку електричної енергії» від 14.03.2018.
- [51] Звіт з оцінки відповідності (достатності) генеруючих потужностей НЕК Укренерго 2018 рік., Режим доступу: <https://ua.energy/wp-content/uploads/2018/11/Zvit-z-otsinky-vidpovidnosti-dostatnosti-generuyuchyh-potuzhnostej.pdf>
- [52] Технічна звітність ПРАТ «НЕК Укренерго» за 2018 рік. Режим доступу: <https://ua.energy/diyalnist/zvitnist/tehnichna/#1534493972464-f265f58b-260c3a1a-868f>
- [53] N. D. Hatzargyriou, A. G. Anastasiadis, J. Vasiljevska, and A. G. Tsikalakis, «Quantification of economic, environmental and operational benefits of microgrids», in *2009 IEEE Bucharest PowerTech: Innovative Ideas Toward the Electrical Grid of the Future*, 2009.

- [54] N. Lidula, and A. Rajapakse, «Microgrids research: A review of experimental microgrids and test systems,» in *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, pp. 186-202, 2011. 125. NRS-048-2, Electricity Supply – Quality of Supply Part 2: Voltage characteristics, compatibility levels, limits and assessment methods.
- [55] Mel Olken, «Smart grid technology», IEEE PES ‘*The Power and Energy Magazine*’, Vol. 10(4), 2012, pp. 4-6, July/August.
- [56] P. K. Olulope, S. P. Chowdhury, S. Chowdhury, and K. A. Folly, «Review of distributed generation, modeling and its impact on power system stability», *Power and Energy Systems*, pp. 193-199, 2009.
- [57] М. Н. Розанов, Надёжность электроэнергетических систем. Москва, СССР: Энергия, 1984.
- [58] Ю. Б. Гук, Теория надёжности в электроэнергетике. Ленинград, СССР: Энергоатомиздат, 1990.
- [59] В. В. Зорин, Р. В. Тисленко, и др., Надёжность систем электроснабжения. Киев, СССР: 1984.
- [60] European Smart Grids Technology Platform: vision and Strategy for Europe's Electricity Networks of Future. *European Commission*, 44 p., 2006.
- [61] W. R. Lachsetal «Power system control in the next century», *IEEE Transmission on Power Systems*, vol. II., № 1, 996.
- [62] Кабінет Міністрів України (від 18 серпня 2017 р. № 605-р) Про схвалення Енергетичної стратегії України на період до 2035 року «Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність».
- [63] С. В. Бахмачук, Ю. С. Громадський, С. М. Савицький, та Д. А. Гапон «Керування графіком навантаження в електричних мережах споживачами-регуляторами», *ScienceRise*, pp. 50-57, 2016. [Online]. Available at: http://nbuv.gov.ua/UJRN/text_2016_2%282%29__11.
- [64] В. Д. Білодід, «Прогнозна структура теплозабезпечення України на період до 2040 року», *Проблеми загальної енергетики*, pp. 24-33, 2016. [Online]. Available at: http://nbuv.gov.ua/UJRN/text_2016_2%282%29__11

- [65] ДП «НЕК» Укренерго», Залучення сонячних та вітрових електростанцій до покриття навантаження ОЕС України, 2018. Available at: <https://www.slideshare.net/Ukrenergo/ss-92759300>.
- [66] НКРЕ (Постанова від 12. 1997 року № 1047а із змінами та доповненнями станом на 05.10.2017) Правила Оптового ринку електричної енергії України. Додаток 2 до Договору між членами Оптового ринку електричної енергії України, Available at: <http://www.er.gov.ua/doc.php?c=1285>:
- [67] Постанова НКРЕКП № 1513 «Про затвердження оптової ринкової ціни на 2018 рік» від 28.12.2017 Available at: <http://www.nerc.gov.ua/?id=30116>:
- [68] UkrEnergo Transmission System Development Plan for 2019-2028 [in Ukrainian]
- [69] П. Д. Лежнюк, В. О. Комар, С. В. Кравчук, В. О. Лесько, В. В. Нетребський, та А. С. Кульматицька, Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 83727 Комп'ютерна програма «Програма збору параметрів функціонування фотоелектричних станцій», Державна служба інтелектуальної власності України. 17.12.2018.
- [70] П. Д. Лежнюк, В. О. Комар, С. В. Кравчук, В. О. Лесько, В. В. Нетребський, та А. С. Кульматицька, Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 83728 Комп'ютерна програма «Програма збору метеопараметрів з доступних сервісів», Державна служба інтелектуальної власності України. 17.12.2018.
- [71] П. Д. Лежнюк, В. О. Комар, С. В. Кравчук, В. О. Лесько, В. В. Нетребський, та А. С. Кульматицька, Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 83733 Комп'ютерна програма «Розпізнавання даних з типових файлів джерел метеопараметрів», Державна служба інтелектуальної власності України. 17.12.2018.
- [72] П. Д. Лежнюк, В. О. Комар, С. В. Кравчук, В. О. Лесько, В. В. Нетребський, та А. С. Кульматицька, Свідоцтво про реєстрацію вторського права на твір № 83729 Комп'ютерна програма «Програма

прогнозування виробітку електроенергії фотоелектричними станціями», Державна служба інтелектуальної власності України. 17.12.2018.

- [73] Постанова НКРЕКП № 641 від «Про затвердження нормативно-правових актів, що регулюють діяльність гарантованого покупця та купівлі електричної енергії за «зеленим» тарифом» від 26.04.2019.
- [74] Ali Ahmadian, Mahdi Sedghi, and Masoud Aliakbar-Golkar «Fuzzy Load Modeling of Plug-in Electric Vehicles for Optimal Storage and DG Planning in Active Distribution Network», *Vehicular Technology IEEE Transactions on*, vol. 66, pp. 3622-3631, 2017, ISSN 0018-9545.
- [75] Hao-Tian Zhang, Kang Chang, Huiling Zhang, and Loi Lei Lai, «A novel probabilistic approach for evaluating fault ride-through capability of wind generation», *Machine Learning and Cybernetics (ICMLC) 2016 International Conference on*, vol. 1, pp. 135-140, 2016, ISSN 2160-1348.
- [76] J. Enslin, and P. Heskes, «Harmonic Interaction Between a Large Number of Distributed Power Inverters and the Distribution Network», *IEEE Transaction on power electronics*, vol. 19, no. 6, pp. 1586-1593, 2004. Doi: 10.1109/PESC.2003.1217719.
- [77] Б. Б. Кобец, и И. О. Волкова, «Smart Grid. Концептуальные положения», *Энергорынок*, № 3. с. 66-72, 2010.
- [78] Б. С. Стогній, О. В. Кириленко, та С. П. Денисюк, «Інтелектуальні електричні мережі електроенергетичних систем та їхнє технологічне забезпечення», *Технічна електродинаміка*, № 6, с. 44-50, 2010, ISSN 1607-7970.
- [79] Ю. Г. Шакарян, и Н. Л. Новиков «Технологическая платформа Smart Grid (основные средства)», *Энергоэксперт*, № 4, с. 42-49, 2009.
- [80] О. А. Буславець, В. В. Кулик, та П. Д. Лежнюк, «Інформаційне забезпечення для ефективного планування заходів зі зменшення втрат електроенергії у розподільних електричних мережах», *Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія «Електротехніка і енергетика»*, № 1, с. 103—109, 2015.

- [81] Andrew Keane, and Mark O'Malley «Optimal Allocation of Embedded Generation on Distribution Networks», *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 20, no. 3, pp. 1640-1646, August 2005.
- [82] Walid El-Khattam Kankar Bhattacharya, Yasser Hegazy and M. M. A. Salama «Optimal Investment Planning for Distributed Generation in a Competitive Electricity Market», *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 19, no. 3, pp. 1674-1684, August 2004. Analytical Approaches for Optimal Placement of Distributed Generation Sources in Power Systems.
- [83] N. S. Rau, and Y.-H. Wan. «Optimum location of resources in distributed planning» *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 9, pp. 2014-2020, Nov. 1994.
- [84] Caisheng Wang, and M. Hashem Nehrir «An Analytical Method for DG Placements Considering Reliability Improvements», *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 19, no. 4, pp. 2068-2076, November 2004.
- [85] Hamid Falaghi, and Mahmood-Reza Haghifam «ACO Based Algorithm for Distributed Generation Sources Allocation and Sizing in Distribution Systems», *PowerTech*, pp. 555-560, 2007.
- [86] Víctor H. Méndez Quezada, Juan Rivier Abbad, and Tomás Gómez San Román «Assessment of Energy Distribution Losses for Increasing Penetration of Distributed Generation», *IEEE Transactions on power systems*, vol. 21, no. 2, pp.533-540, May 2006.
- [87] Seyed Mohammad Hossein Nabavi, Somayeh Hajforoosh, and Mohammad A. S. Masoum, «Placement and Sizing of Distributed Generation Units for Congestion Management and Improvement of Voltage Profile using Particle Swarm Optimization», *IEEE Transactions on Power Systems*, 2011.
- [88] Andrew Keane, Luis (Nando) F. Ochoa, Eknath Vittal, Chris J. Dent, and Gareth P. Harrison, «Enhanced Utilization of Voltage Control Resources With Distributed Generation», *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 26, no. 1, pp. 252-260, February 2011.

- [89] Nikhil K. Ardeshta, and Badrul H. Chowdhury, «Supporting Islanded Microgrid Operations in the Presence of Intermittent Wind Generation», *IEEE Transactions on Power Systems*, pp. 1-8, 2010.
- [90] C. L. T. Borges, and D. M. Falcao, «Optimal distributed generation allocation for reliability, losses, and voltage improvement», *International Journal of Power and Energy Systems*, vol. 28, no. 6, pp. 413-420, July 2006.
- [91] Y. Alinejad-Beromi, M. Sedighzadeh, and M. Sadighi «A Particle Swarm Optimization for Siting and Sizing of Distributed Generation in Distribution Network to Improve Voltage Profile and Reduce THD and Losses».
- [92] X. Chen, and W. Gao, «Effects of Distributed Generation on Power Loss, Load ability and Stability», *IEEE Southeastcon*, pp. 468-473, April 2008.
- [93] M. Gandomkar, M. Vakilian and M. Ehsan, «A Combination of Genetic Algorithm and Simulated Annealing for Optimal DG Allocation in Distribution Networks», *CCECE CCGEI*, Saskatoon, IEEE 2005.
- [94] Walid El-Khattam, Kankar Bhattacharya, Yasser Hegazy and M. M. A. Salama, «Optimal Investment Planning for Distributed Generation in a Competitive Electricity Market», *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 19, no. 3, pp. 1674-1684, August 2004. Analytical Approaches for Optimal Placement of Distributed Generation Sources in Power Systems.
- [95] Hamid Falaghi, and Mahmood-Reza Haghifam «ACO Based Algorithm for Distributed Generation Sources Allocation and Sizing in Distribution Systems», *PowerTech*, pp. 555-560, 2007.
- [96] Seyed Mohammad Hossein Nabavi, Somayeh Hajforoosh, and Mohammad A. S. Masoum, «Placement and Sizing of Distributed Generation Units for Congestion Management and Improvement of Voltage Profile using Particle Swarm Optimization», *IEEE*, 2011.
- [97] Andrew Keane, Luis (Nando) F. Ochoa, Eknath Vittal, Chris J. Dent, and Gareth P. Harrison, «Enhanced Utilization of Voltage Control Resources With Distributed Generation», *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 26, no. 1, pp. 252-260, February 2011.

- [98] C. L. T. Borges, and D. M. Falcao, «Optimal distributed generation allocation for reliability, losses, and voltage improvement», *International Journal of Power and Energy Systems*, vol. 28, no. 6, pp. 413-420, July 2006.
- [99] X. Chen, and W. Gao, «Effects of Distributed Generation on Power Loss, Load ability and Stability», *IEEE Southeastcon*, pp. 468-473, April 2008.
- [100] L. Wang, and C. Singh, «Reliability-Constrained Optimum Placement of Reclosers and Distributed Generators in Distribution Networks Using an Ant Colony System Algorithm», *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics - Part C: Applications and Reviews*, vol. 38, no. 6, November 2008.
- [101] R. Medeiros, X. Xu, and E. Makram, «Assessment of Operating Condition Dependent Reliability Indices in Microgrids», *Journal of Power and Energy Engineering*, no. 4, p. 56-66, 2016, doi: 10.4236/jpee.2016.44006.
- [102] Jumpei Baba, and Akihiko Yokoyama, «Voltage control of distribution network with a large penetration of photovoltaic generations using facts devices», *Electrical Engineering in Japan*, vol. 165, № 3. p. 16-28, 2008, doi:10.1002/eej.20499
- [103] M. Koike, T. Ishizaki, N. Ramdani and J. Imura, «Optimal Scheduling of Storage Batteries and Power Generators Based on Interval Prediction of Photovoltaics – Monotonicity Analysis for State of Charge», in *IEEE Control Systems Letters*, vol. 4, no. 1, pp. 49-54, Jan. 2020. doi: 10.1109/LCSYS.2019.2921953
- [104] P. C. D. Goud, and R. Gupta, «Dual-mode control of multi-functional converter in solar PV system for small off-grid applications», in *IET Power Electronics*, vol. 12, no. 11, pp. 2851-2857, 18 9 2019. doi: 10.1049/iet-pel.2018.6313.
- [105] S. Lin, Y. Wang, M. Liu, G. Fan, Z. Yang and Q. Li, «Stochastic optimal dispatch of PV/wind/diesel/battery microgrids using state-space approximate dynamic programming», in *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 13, no. 15, pp. 3409-3420, 6 8 2019. doi: 10.1049/iet-gtd.2018.5840.

- [106] M. Combe, A. Mahmoudi, M. H. Haque and R. Khezri, «Optimal sizing of an AC-coupled hybrid power system considering incentive-based demand response», in *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 13, no. 15, pp. 3354-3361, 6 8 2019. doi: 10.1049/iet-gtd.2018.7055.
- [107] H. Setiadi, N. Mithulanathan, R. Shah, T. Raghunathan and T. Jayabarathi, «Enabling resilient wide-area POD at BESS in Java, Indonesia 500 kV power grid», in *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 13, no. 16, pp. 3734-3744, 20 8 2019. doi: 10.1049/iet-gtd.2018.6670
- [108] E. Fedato et al., "Feasibility analysis of GRIDSOL technology in Fuerteventura: A case study," in *The Journal of Engineering*, vol. 2019, no. 18, pp. 5208-5213, 7 2019. doi: 10.1049/joe.2018.9285.