

Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет

КОТИЛКО ІРИНА ВАДИМІВНА

УДК 621.316.1.29

**ОПТИМІЗАЦІЯ СУМІСНОГО ВИКОРИСТАННЯ РІЗНОТИПНИХ
ВІДНОВЛЮВАЛЬНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ
НАДІЙНОСТІ РОБОТИ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ**

05.14.02 – електричні станції, мережі і системи

Автореферат

дисертації на здобуття наукового ступеня

кандидата технічних наук

Вінниця – 2019

Дисертацією є кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису..

Робота виконана у Вінницькому національному технічному університеті, Міністерство освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Лежнюк Петро Дем'янович,
Вінницький національний технічний університет,
завідувач кафедри електричних станцій та систем.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Говоров Пилип Парамонович,
Харківський національний університет міського
господарства імені О.М. Бекетова,
професор кафедри світлотехніки та джерел світла;

кандидат технічних наук, доцент
Кацадзе Теймураз Луарсабович,
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського»,
доцент кафедри електричних мереж та систем.

Захист відбудеться «19» грудня 2019 р. о 10⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради К 05.052.05 у Вінницькому національному технічному університеті за адресою: 21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95, ГНК, ауд. 210.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Вінницького національного технічного університету за адресою: 21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95, ГНК.

Автореферат розісланий «18» листопада 2019 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

О. Б. Бурикін

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

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.

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 акумуляування 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 [1] запропоновано метод та у [2] 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 [3] запропоновано алгоритм методу відновлення електропостачання споживачів розподільних електричних мереж та виконано оцінювання якості електропостачання електричних мереж з розосередженим генеруванням. В [4] 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 [5]. В [6] запропоновано метод оптимізації режимів електричних мереж, а у [7] 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 [8], а в [9] їх пронормовано. В [10] запропоновано метод самоорганізації режимів електричних мереж. Метод оцінювання надійності електропостачання розглянуто в [11], а в [12] – метод підвищення енергоефективності локальних електричних систем за рахунок сумісного використання різнотипних розосереджених джерел енергії.

Результати теоретичних досліджень, що викладені у [1]–[12], 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 (25 найменувань) і 4 додатків. Основний зміст викладено на 109 сторінках друкованого тексту, містить 48 рисунків, 10 таблиць. Загальний обсяг роботи – 172 сторінки.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність роботи, сформульовано мету і задачі; наведено наукову новизну і практичну цінність отриманих результатів, також подано відомості щодо апробації роботи, особистого внеску здобувача та публікацій. Зазначено зв'язок роботи з науковими програмами та темами.

У **першому розділі** проведено аналіз умов функціонування електричних мереж з відновлювальними джерелами електроенергії в умовах впровадження нового ринку електроенергії, показано вплив нестабільності генерування ВДЕ на надійність роботи електричних мереж та якість електроенергії в них. Також в розділі уточнено задачі наукового дослідження.

В балансі потужності розподільних електричних мереж (РЕМ) суттєве значення має заявлений графік генерування ВДЕ $P_{ВДЕ}(t)$, точність дотримання якого залежить від точності прогнозу метеопараметрів. Крайні системи прогнозування «на день наперед» дають похибку в межах до $\pm 20\%$. Така похибка не може задовольнити вимоги щодо точності погодинного графіка генерування ФЕС 10%. Підвищити точність погодинного генерування ФЕС на добу наперед можна, зменшивши похибку прогнозу метеопараметрів, що має об'єктивні обмеження, або використовуючи інші методи.

Як показує практичний досвід, кращий метод прогнозування генерування ФЕС – це об'єднання усереднення прогнозів, отриманих від різних постачальників. Інший шлях – організація балансувального в реальному часі пункту для групи станцій, генерування кожної з них моделюється й прогнозується окремо. Інтегровані прогнози від локальних виробників дають більш точне значення сумарного генерування. Разом з тим, такий підхід спрощує і здешевлює підтримування балансу з застосуванням накопичувачів електроенергії або з використанням системного резерву як платної послуги.

Потрібно відмітити, що ФЕС розміщені нерівномірно по території України, тому досить важко оцінити їх вплив на надійність електропостачання електричних мереж. На рис. 1 наведена зміна SAIDI для 2011, 2015–2018 років, середні значення для ОЕС стосовно міських і сільських електричних мереж.

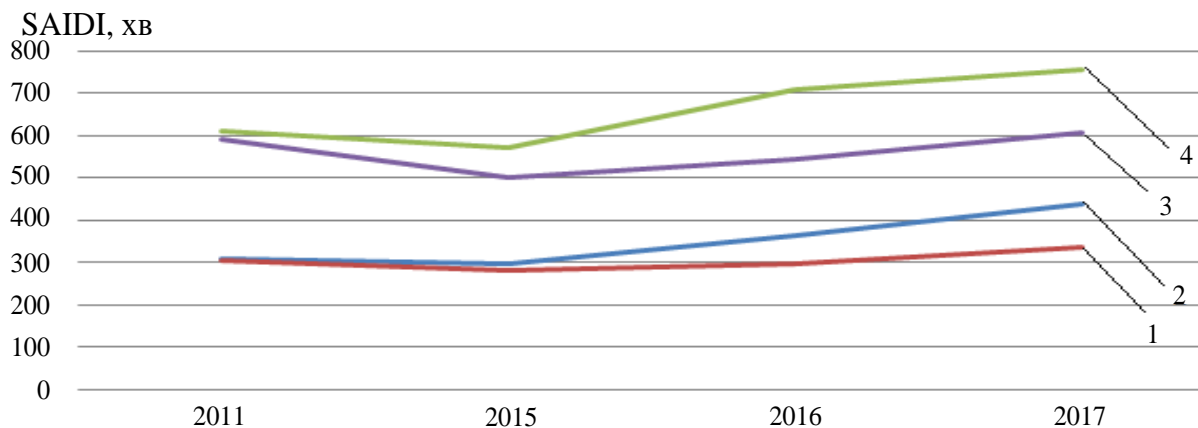


Рисунок 1 – Запланований показник SAIDI (1) та фактичний (2) для міських електричних мереж та 3 і 4 – відповідно, для сільських мереж ОЕС України

Виходячи зі статистичних даних, збільшення потужності генерування відновлювальних джерел енергії, активне впровадження яких в електричні мережі почало зростати в 2015 році, може бути причиною підвищення довгих перерв в електропостачанні (SAIDI) електричних мереж.

Проаналізовано темпи збільшення генерування ВДЕ в розрізі кожної енергопостачальної компанії. Серед інших виділено ПАТ «Вінницяобленерго» (рис. 2), оскільки тут, починаючи з 2015 року, приріст потужності генерування ФЕС був найбільшим. Аналізується лише генерування ФЕС, тому що вітровий потенціал для цього регіону є незначним. Отже, потужність генерування на початку 2015 року становила 41,3 МВт і збільшилися майже в чотири рази за наступні три роки – в кінці 2018 року потужність ФЕС становила 180 МВт. Однак вплив ФЕС на надійність мереж тут суттєво відрізняється від впливу на мережі ОЕС в цілому (див. рис. 1).

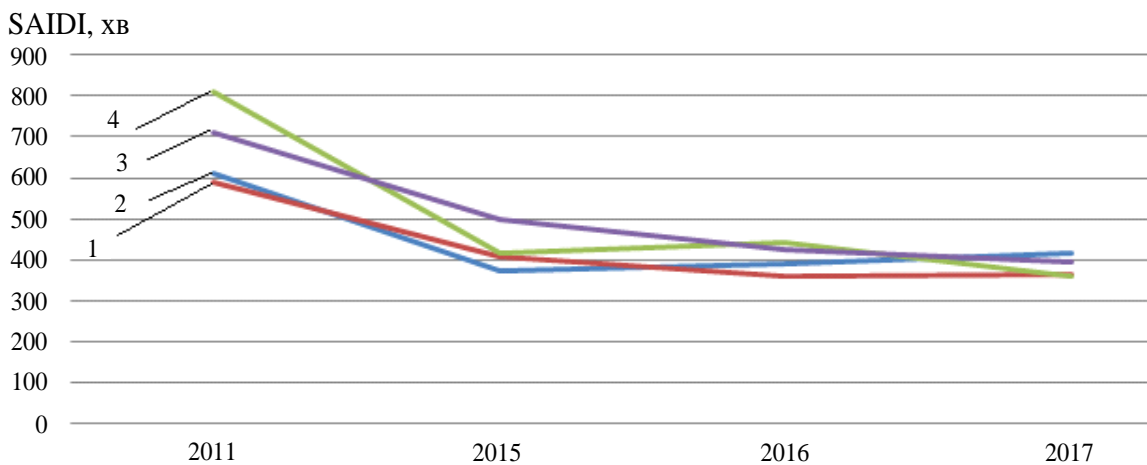


Рисунок 2 – Запланований показник SAIDI (1) та фактичний (2) для міських електричних мереж та (3) і (4), відповідно, для сільських мереж АТ «Вінницяобленерго»

Одночасне покращення рівня технічного оснащення мереж, як спостерігається у «Вінницяобленерго», разом з розбудовою ФЕС дозволяє розкрити їх потенціал з огляду на можливість забезпечення дотримання показника тривалості довгих перерв в електропостачанні в міських і сільських електричних мережах. Аналіз залежностей на рис. 1 та 2 дозволяє зробити висновок, що оцінити і досягти максимального ефекту від впровадження відновлювальних джерел енергії, з огляду на можливість забезпечення нормативних показників надійності (безперебійності) електропостачання, можна, враховуючи технічний стан електричної мережі, до якої вони приєднуються.

Генерування ФЕС має значний потенціал для підвищення ефективності розподільної електричної мережі, і це потрібно заохочувати. Однак конструкція системи розподілу і методи роботи, як правило, на основі радіальних потоків потужності, створюють низку проблем для успішного впровадження розосереджених джерел енергії. Крім задачі балансування в електричних

мережах для підвищення техніко-економічної ефективності сумісної експлуатації РДЕ і розподільних електричних мереж необхідно розв'язати ще задачі зменшення втрат електроенергії в розподільних електричних мережах і покращання якості електропостачання споживачів.

У **другому розділі** розроблено математичні моделі для визначення обсягів генерування фотоелектричних станцій, що їх може прийняти об'єднана електроенергетична система України. Встановлено, що подальший розвиток ВДЕ можливий лише при збільшенні маневрових потужностей. Обґрунтовано використання накопичувачів електроенергії для подальшого нарощування генерування ВДЕ в електричних мережах. Такі системи акумулювання електроенергії (САЕ) можна буде використовувати для дотримання графіка генерування ФЕС на добу наперед. Зважаючи на досить великий обсяг капіталізації таких систем, сформовано цільову функцію, що враховує витрати на будівництво САЕ, вартість покриття небалансів і зменшення циклу заряд/розряд.

Кількість електроенергії, що ТЕС виробляє за добу (з урахуванням збільшення генерування ВДЕ), можна визначити за формулою

$$W'_{TEC(\partial)} = W_{нав(\partial)} - W_{AEC(\partial)} - W_{ТЕЦ(\partial)} - W'_{ВДЕ(\partial)} - W_{ГЕС(\partial)} \pm W_{ГАЕС(\partial)} - W'_{TEC(\partial)}, \quad (1)$$

де $W_{нав(\partial)}$ – сумарна спожита електроенергія за добу, кВт-год., $W_{AEC(\partial)}$ – електроенергія, що генерується атомними електростанціями за добу, кВт год., $W_{ТЕЦ(\partial)}$ – електроенергія, що генерується теплоелектроцентралями за добу, кВт-год., $W'_{ВДЕ(\partial)}$ – електроенергія, генерована відновлювальними джерелами енергії з урахуванням її збільшення за добу, кВт-год., $W_{ГЕС(\partial)}$, $W_{ГАЕС(\partial)}$ – електроенергія, що генерована ГЕС та ГАЕС відповідно, кВт-год., $W'_{TEC(\partial)}$ – зменшена кількість електроенергії, генерована тепловими електростанціями за добу, кВт-год.

Тоді потужність ТЕС за годину буде визначатися так:

$$P'_{TEC_t} = \frac{W'_{TEC(\partial)}}{24}. \quad (2)$$

Для вирішення проблеми погодинного балансування потужностей в енергосистемі зі збільшенням частки генерування від ВДЕ рівняння балансу записується у вигляді

$$P_{нав(t)} = P_{AEC(t)} + P_{ТЕЦ(t)} + P'_{ВДЕ(t)} + P_{ГЕС(t)} + P'_{TEC(t)} \pm P_{ГАЕС(t)} \pm P_{САЕ(t)}, \quad (3)$$

де $P_{нав(t)}$ – сумарна спожита електроенергія за добу, кВт-год., $P_{AEC(t)}$ – електроенергія, що генерується атомними електростанціями за добу, кВт год., $P_{ТЕЦ(t)}$ – електроенергія, що генерується теплоелектроцентралями за добу,

кВт-год., $P'_{ВДЕ(t)}$ – електроенергія, генерована відновлювальними джерелами енергії з урахуванням її збільшення за добу, кВт-год., $P_{ГЕС(t)}, P_{ГАЕС(t)}$ – електроенергія, що генерована ГЕС та ГАЕС відповідно, кВт-год., $P'_{ТЕС(t)}$ – зменшена кількість електроенергії, генерована тепловими електростанціями за добу, кВт-год., $P_{САЕ(t)}$ – потужність накопичувача, в кВт-год.

Типовий добовий графік генерування та навантаження зі збільшеною потужністю ВДЕ буде мати вигляд, зображений на рис. 3, а. Для балансування системи необхідно також нарощувати балансувальні потужності. Графік потужності САЕ дає змогу точніше визначити, яку ємність має мати накопичувач.

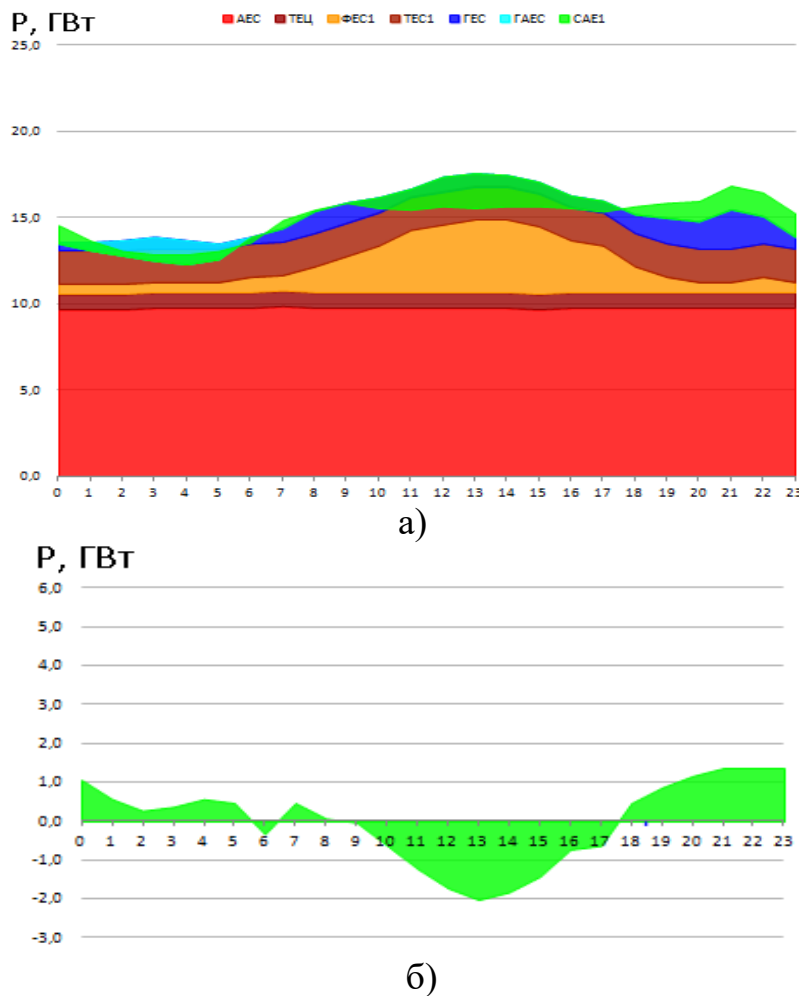


Рисунок 3 – Типовий графік структури потужностей – а), графік роботи накопичувача – б)

З рис. 3, б можна виділити характеристику, яку буде мати система накопичення енергії; зрозуміло, що при повному витісненні генерування ТЕС з системи, ємність САЕ значно збільшиться. Таке регулювання можливе лише у весняно-літній сезон, тому, незважаючи на всі переваги даного підходу, в системі мають залишитись ТЕС для осінньо-зимового балансування. Їх потужність потрібно вивести на стабільний рівень, а регулювання (за

необхідності заповнень мінімальних і максимальних піків) здійснювати за допомогою САЕ. В табл. 1 наведені дані збільшення потужності та ємності САЕ відносно потужності ФЕС.

Збільшення обсягів генерування ФЕС можливе лише шляхом економічного стимулювання розбудови нових акумулювальних або маневрених потужностей. Маючи значний рівень акумулювальних потужностей, необхідно оцінювати прогнозованість ВДЕ для подальшого формування балансу генерування та споживання.

Таблиця 1 – Залежність збільшення потужності та ємності САЕ відносно потужності ФЕС

Потужність ФЕС, МВт	Ємність САЕ, МВт-год	Потужність САЕ, МВт	Відношення ємності САЕ до її потужності
2000	6343	1104	5,7
3500	7607	1299	5,8
5000	9500	1635	5,8
6500	11716	2049	5,7
9000	15762	2800	5,6
15000	26105	4712	5,5

Визначення ємності накопичувача є задачею техніко-економічною, тому необхідно враховувати витрати на його встановлення та експлуатацію. Цільова функція виглядатиме так:

$$B_{\Sigma} = B(W_{n.e}) + B(W_{граф}) + B_{експ} \rightarrow \min, \quad (4)$$

де $B(W_{n.e}) = \epsilon_{n.e}^{num} \cdot W_{n.e}$ – витрати на встановлення накопичувача певної ємності, грн; $\epsilon_{n.e}^{num}$ – питомі витрати на накопичувач певної ємності, грн/кВт год; $B(W_{граф})$ – штрафні санкції за недотримання заявленого на добу наперед графіка генерування з урахуванням використання накопичувача певної ємності, грн; $B_{експ}$ – експлуатаційні витрати на накопичувач певної ємності, грн.

На рисунку 4 проілюстровано визначення оптимальної ємності накопичувача. Запропонований метод визначення ємності накопичувача для групи станцій ґрунтується на врахуванні їх імовірнісних характеристик та точності системи прогнозування генерування ФЕС на добу наперед. Вказана система дає точність прогнозу на рівні 80%, що, загалом, відповідає середньому показнику точності таких систем. Збільшення обсягів генерування відновлювальних джерел енергії в ОЕС України можливе лише за рахунок збільшення маневрових потужностей. В розділі 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 відпрацювали свій технічний ресурс.

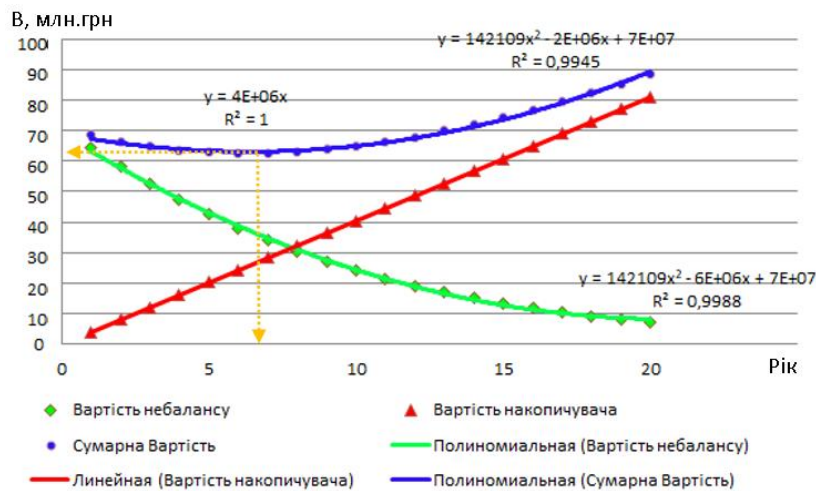


Рисунок 4 – Визначення оптимальної ємності накопичувача

Більш того, такі системи можна буде використовувати як накопичувач для дотримання графіка генерування ФЕС на добу наперед.

У **третьому розділі** виконується алгоритмічна реалізація запропонованих у другому розділі методів. Розроблено алгоритми для визначення ємності накопичувача для балансування режиму електричної мережі та для підвищення надійності її роботи.

Балансування відновлювальних джерел енергії потребує значних капіталовкладень. Виходячи з цього, доцільніше буде встановлювати накопичувач для балансування групи виробників за зеленим тарифом, оскільки такий підхід дозволяє балансувати більше потужностей відновлювальних джерел енергії, наприклад, ФЕС на однаковій ємності накопичувача. Це пояснюється тим, що графіки генерування фотоелектричних станцій при накладанні дають більш пологий «купол» і різких викидів потужності на такому графіку немає, що дає змогу отримати кращі техніко-економічні характеристики накопичувача.

Розроблений алгоритм (рис. 5) побудований на основі погодинних даних по генеруванню фотоелектричних станцій – $P_{\phi t}^{\text{ФЕС}}$, МВт-год, встановленій потужності фотоелектричних станцій $P_{\text{ном}}^{\text{ФЕС}}$, МВт, α – кут нахилу панелей ФЕС.

Прогноз генерування ФЕС – $P_{\text{Пр } t}^{\text{ФЕС}}$, МВт-год, співставляється з фактом і на основі погодинного співставлення добових графіків визначається обсяги небалансу, що необхідно компенсувати накопичувачем. Інформацію прогнозів, та фактично відпущеної електроенергії сортують по часу по кожному об'єкту виробника за зеленим тарифом, що входить в балансуєчу групу. Сума погодинних небалансів по кожній станції в рамках однієї доби дає змогу визначити ємність накопичувача, який би покривав небаланси кожного окремого виробника за зеленим тарифом. Такий підхід дозволяє визначити ємність накопичувача виходячи не з встановленої потужності станції, а саме з обсягів небалансу. Оператор системи накопичення електроенергії балансує групу станцій, а потім в залежності від обсягів небалансу та годин їх виникнення розділяє вартість балансуєчої електроенергії.

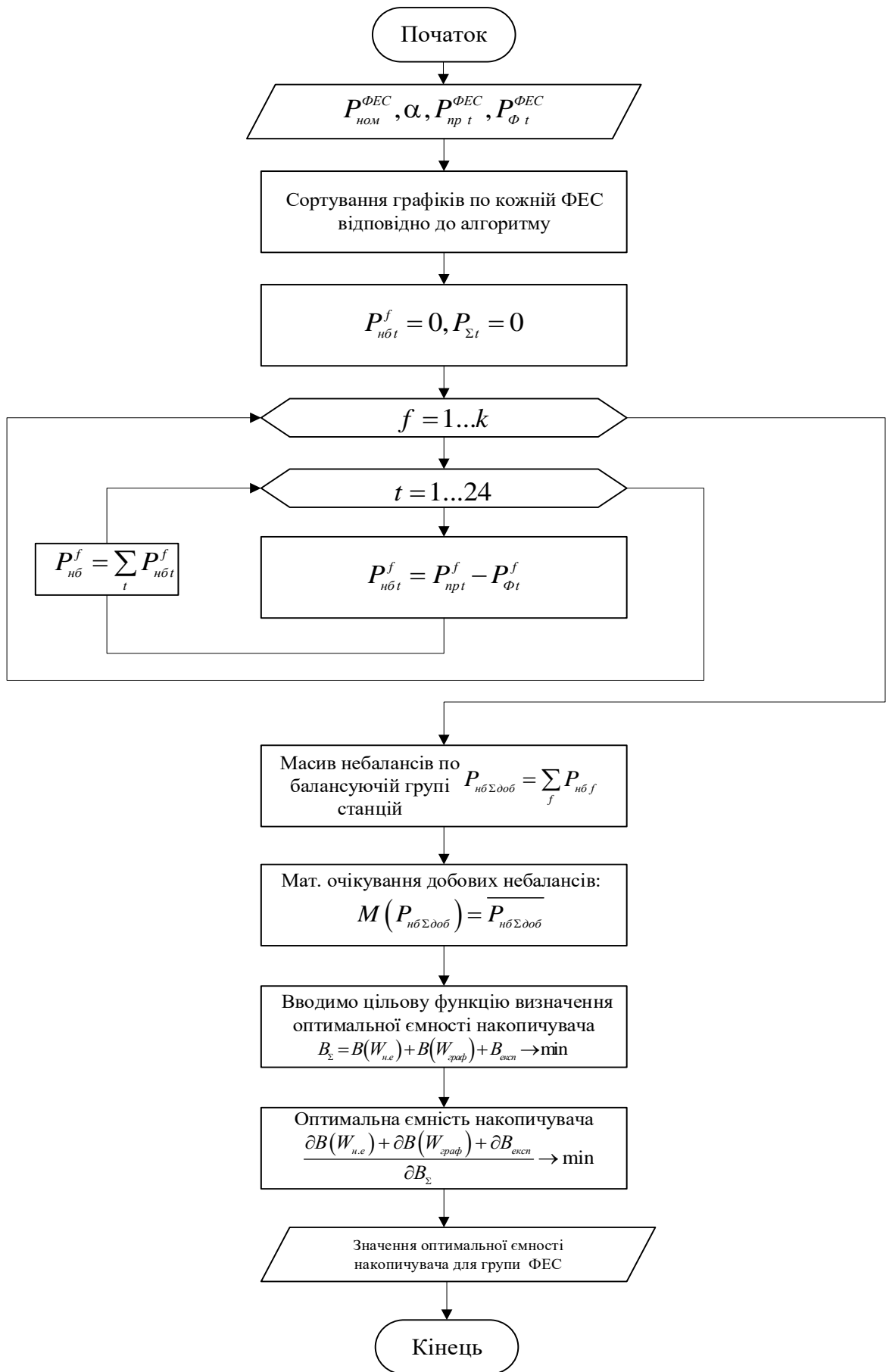


Рисунок 5 – Алгоритм визначення ємності накопичувача

Для підвищення надійності роботи розподільної електричної мережі розроблено алгоритми відновлення електропостачання її споживачів (рис. 6).

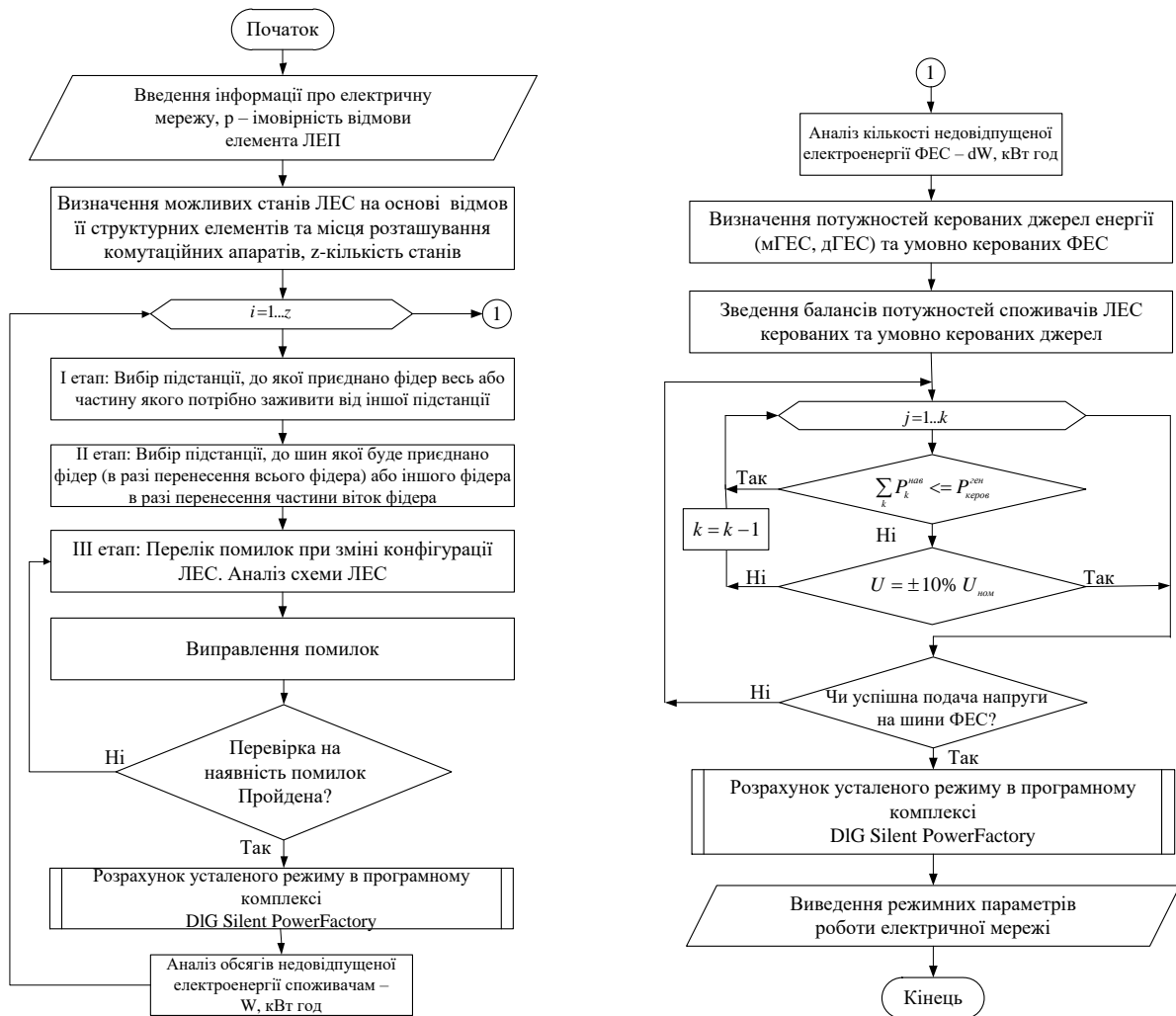


Рисунок 6 – Алгоритм відновлення електропостачання споживачів РЕМ

Оскільки метод відновлення постачання електроенергії споживачам РЕМ ґрунтується на основі аналізу потоку відмов її структурних елементів, то вводимо позначення p – імовірність відмови елемента лінії електропередачі (ЛЕП). Враховуючи розміщення комутаційних апаратів (КА), можливі різні схеми заживлення і, відповідно, стани РЕМ на основі відмов її структурних елементів та місця розташування комутаційних апаратів.

Для аналізу різних варіантів схем живлення споживачів – станів РЕМ – було використано програмний засіб «DIGSilent Power Factory», що дозволяє змінювати конфігурацію електричної мережі для живлення споживачів від іншого фідера. На першому етапі вказуємо, з якої підстанції та який фідер чи його частину планується заживити з іншого фідера. Наступним етапом є вибір підстанції та фідера, на який планується перенести частину віток іншого фідера. Потрібно зауважити, що для безпомилкового перенесення частини віток фідера потрібно мати чітку інформацію щодо місця встановлення та положення комутаційних апаратів. В разі правильного виконання перенесення віток у вікні «перевірки результатів» помилок не буде. При кожній конфігурації схеми буде

певна кількість недовідпущеної електроенергії споживачам за звітний період, а також обсяги нереалізованої електроенергії ФЕС.

Блок визначення потужностей керованих джерел енергії (малих ГЕС) та умовно керованих ФЕС дозволяє за наявною схемою визначити можливість подачі напруги від керованих джерел до ФЕС в умовах відсутності електропостачання централізованих джерел живлення. При відсутності централізованих джерел генерування балансувальний та базисний вузли будуть на шинях керованого джерела живлення; для підтримання стійкої роботи утвореної системи потрібно звести баланс потужностей навантаження та сумарного генерування всіх джерел – $\sum_k P_k^{наб} \leq P_{керов}^{ген}$ й забезпечити дотримання нормативних показників якості електроенергії.

У **четвертому розділі** показано ефективність використання розроблених математичних моделей та алгоритмів шляхом обчислювальних експериментів реальних районних електричних мереж.

Розглянуто фрагмент схеми Ямпільських РЕМ (рис. 7). В нормальному режимі роботи ФЕС Гальжбієвська–2 та Гальжбієвська–3, потужностями 450 кВт та 800 кВт відповідно, видають потужність в фідер 10 ПС «Ямпіль 110/10 кВ», а ФЕС Гальжбієвська–1 та ГЕС Гальжбієвська генерують електроенергію в фідер 42, що приєднаний до ПС «Михайлівка 110/10 кВ». Результати розрахунку нормального режиму подані в додатку Б. А втрати в електричній мережі при цьому дорівнюють $\Delta P + jQ = 0.61 + j0.89$ МВА, що становить 8.7% від сумарної потужності навантаження. Таким чином, бачимо позитивний ефект від встановлення ФЕС в електричній мережі, оскільки норматив втрат потужності у відсотках для АТ «Вінницяобленерго» становить 14%. Втрати потужності для цієї ж електричної мережі без урахування відновлювальних джерел, коли споживання задовольняється лише від зовнішніх надходжень, становлять $\Delta P_{безВДЕ} + jQ_{безВДЕ} = 1.33 + j1.68$ МВА, тобто 18.2% від навантаження (рис. 8).

Зменшення втрат потужності зі встановленням відновлювальних джерел енергії досягається за рахунок розвантаження електричних мереж. Проте позитивний аспект зменшення потужності може нівелюватися, оскільки необхідно враховувати технічний стан електричної мережі, до якої приєднується джерело генерування. Коефіцієнт готовності ЕМ, що забезпечує безперебійне постачання після приєднання ВДЕ, зменшився на $\Delta k_g = 0.0002$, що вказує на необхідність проведення аналізу надійності електричної мережі, до якої приєднуватиметься розосереджене джерело генерування.

При відновленні електропостачання фрагмент електричної мережі заживлюється сумісним генеруванням малої ГЕС та трьох фотоелектричних станцій, сумарна потужність генерування яких становить 1960 кВт. Відповідно виділяється частина мережі, навантаження якої дорівнює генеруванню ФЕС на цей час доби. При цьому в першу чергу забезпечується живлення споживачів першої та другої категорій за надійністю. Напруга на шини ФЕС подається від малої ГЕС потужністю 350 кВт. Втрати потужності для фрагмента схеми

дорівнюють $\Delta P + Q = 0.022 + j0.38$ МВА, що становить 1,8% від сумарної потужності навантаження (рис. 8).

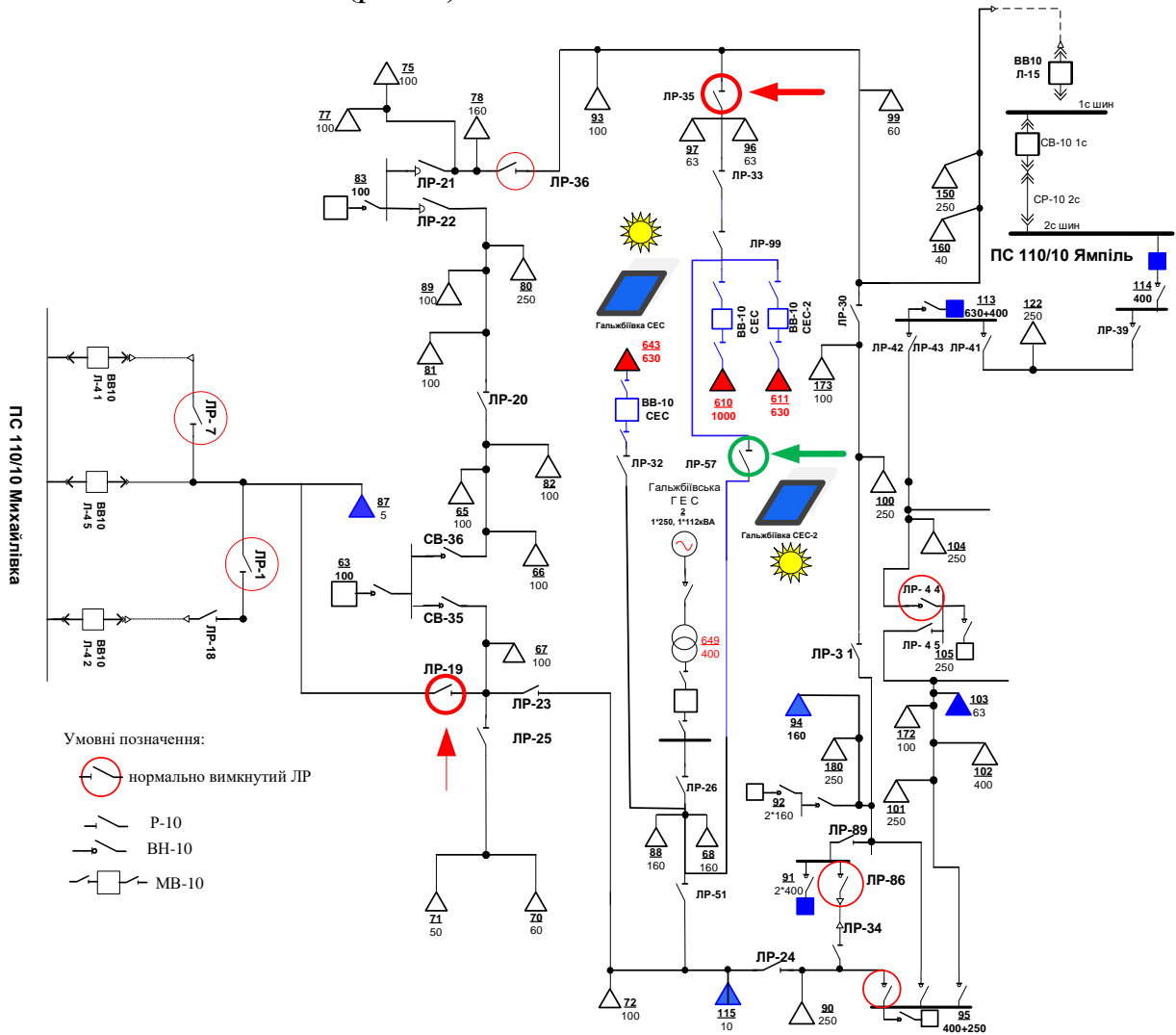


Рисунок 7 – Фрагмент схеми Ямпільських електричних мереж 110 – 10 кВ.

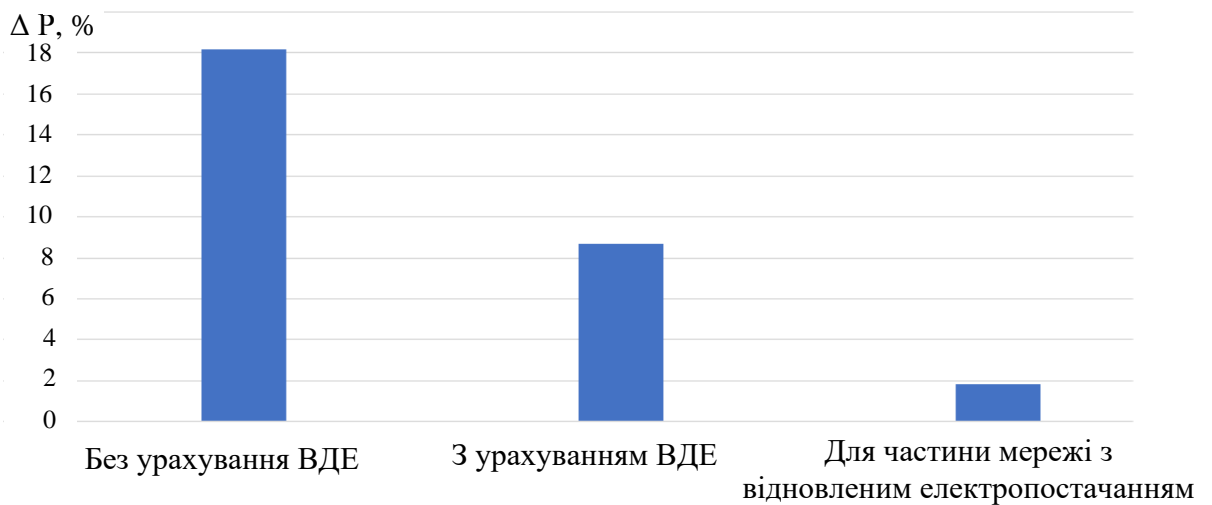


Рисунок 8 – Зміна втрат активної потужності у відсотках від навантаження у фрагменті схеми Ямпільських електричних мереж

На рис. 9 показано SAIDI для схеми без ВДЕ та з ВДЕ. З під'єднанням ВДЕ перерва в електропостачанні трохи збільшилася. З урахуванням того, що частина споживачів мережі заживлюється завдяки подачі напруги на шини ФЕС від малої гідроелектростанції, SAIDI зменшується. Для виділеної частини мережі недовідпуск електроенергії за звітний період зменшується на 14 % у разі використання запропонованого методу.

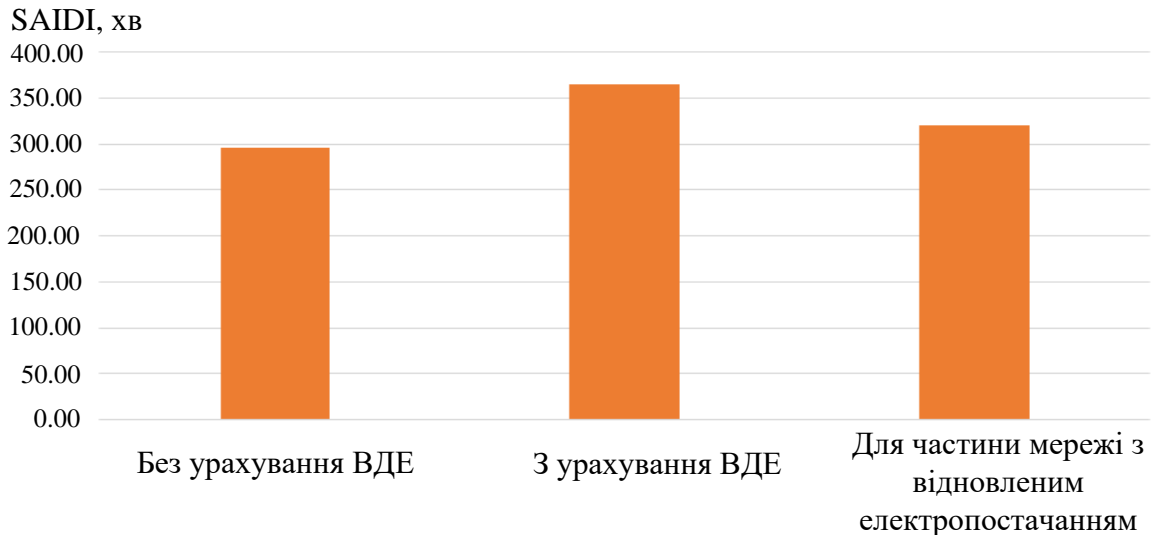


Рисунок 9 – Показники тривалості недовідпуску електроенергії для трьох варіантів схем мережі, хв.

Запропонований метод відновлення електропостачання дозволяє оптимально інтегрувати відновлювальні джерела генерування, зокрема малі ГЕС та ФЕС, в електричні мережі. В даному випадку мала ГЕС використовується як джерело подачі живлення на шини ФЕС у разі втрати централізованого електропостачання.

Для забезпечення балансової надійності виділеного фрагмента електричної мережі як резерв встановлюється накопичувач електроенергії. Ємність його визначається згідно з запропонованим методом. Вартість небалансу для Гальжбієвської ФЕС оцінюємо за результатами прогнозованого та фактичного вироблення електроенергії (рис. 10).

Визначення оптимальної ємності накопичувача здійснюється за моделлю (4). З різниці погодинних добових графіків факту та прогнозу генерування визначаються небаланси за рік. Зроблено такі припущення: вартість 1кВт-год електроенергії на балансувальному ринку складає 3 грн; термін окупності – 8 років; вартість 1кВт-год ємності накопичувача – 3750 грн. Результати розрахунків наведені в табл. 2. З урахуванням витрат на покриття небалансів оптимальною є ємність 500 кВт-год.

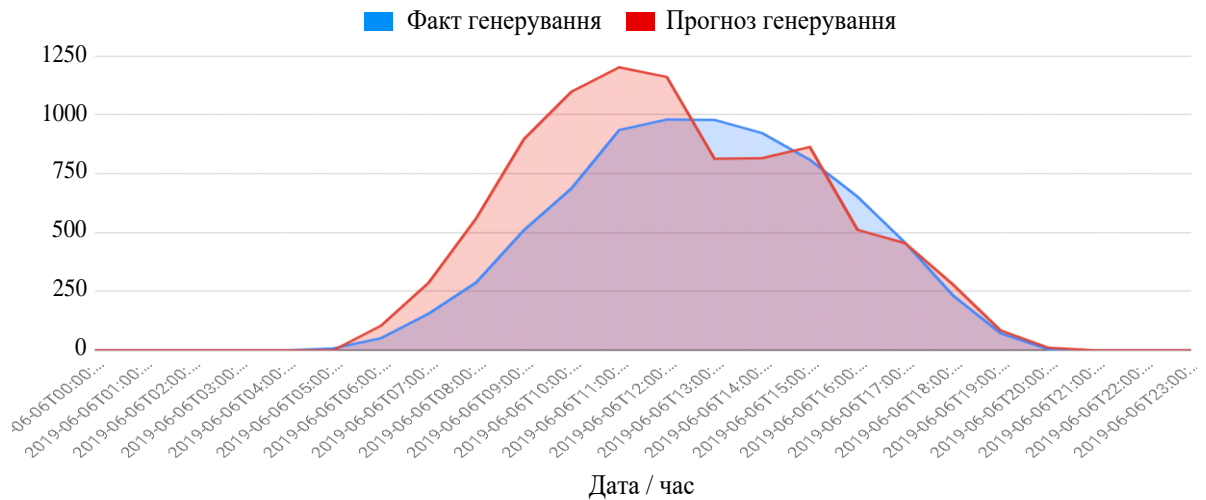


Рисунок 10 – Графік фактичного генерування та прогноз для Гальжбієвської ФЕС

Таблиця 2 – Результати визначення оптимальної ємності накопичувача

Ємність накопичувача, МВт-год	Небаланс, кВт-год	Вартість небалансу, грн	Вартість накопичувача, грн	Сумарна вартість, грн
0.15	2363283.6	7089851	562500	7652351
0.3	2117575.4	6352726	1125000	7477726
0.5	1824694.9	5474085	1875000	7349085
1	1233448.7	3700346	3750000	7450346
2	539166.8	1617500	7500000	9117500

Результати проведених розрахунків підтверджують позитивний вплив джерел розосередженого генерування на режимну та балансову надійності локальних електричних систем. Проте міра цього позитивного впливу може бути різною залежно від типу відновлюваних джерел. Можна стверджувати, що позитивний ефект від використання ФЕС електричних мережах отримується лише за умови їх узгодженого генерування з графіком локального електроспоживання.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ

В роботі отримано нове вирішення актуальної науково-прикладної задачі підвищення надійності роботи електричних мереж енергосистем за рахунок розроблення методів оптимального інтегрування відновлювальних джерел енергії, зокрема ФЕС та малих ГЕС завдяки їх сумісного використання, а саме:

1. Результати проведених розрахунків підтверджують можливість позитивного впливу джерел розосередженого генерування на режимну та балансову надійності розподільних електричних мереж. Міра цього позитивного впливу може бути різною залежно від типу відновлювальних джерел та міри їх прогнозованості, а також технічного стану електричної

мережі. Можна стверджувати, що позитивний ефект від використання ФЕС в електричних мережах отримується лише за умови скоординованого сумісного використання ВДЕ та накопичувачів електроенергії;

2. В роботі обґрунтовано використання джерел накопичення електроенергії для подальшого нарощування відновлювальних джерел енергії та побудови більш гнучкої системи електропостачання, обґрунтовано використання Battery energy storage system (BESS) для подальшого нарощування генерування ВДЕ. Визначено основні технічні характеристики, а саме: ємність накопичувача та його потужність, і встановлено їх залежність від потужності генерування ВДЕ в ОЕС України;

3. Для підвищення балансової надійності в роботі запропоновано метод визначення ємності накопичувача для фотоелектричної станції. Показано, що запропонований метод дозволяє отримати низку переваг:

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

4. Оскільки електричні мережі енергосистем проектувалися без урахування можливості приєднання розосереджених джерел генерування та через значне спрацювання їх технічного ресурсу, це робить неможливим приєднання ФЕС без зменшення надійності таких мереж. Виходячи з цього в роботі запропоновано метод відновлення електропостачання частини електричної мережі за рахунок сумісного використання різнотипних РДЕ, в даному випадку ФЕС та малих ГЕС;

5. Працездатність та ефективність запропонованих у роботі методів і алгоритмів підтверджена обчислювальними експериментами з оптимізації та керування режимами електричних мереж з відновлювальними джерелами електроенергії. Запропоновані методи реалізовані та передані для дослідної експлуатації в компанію ТОВ «НЕСС ЕНЕРДЖІ», а алгоритм визначення ємності накопичувача, що рекомендується для встановлення на фотоелектричні станції, передано для дослідної експлуатації у ТОВ «НЕСС РНД ЦЕНТР». Результати дисертаційного дослідження впроваджено в навчальний процес Вінницького національного технічного університету.

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. 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, no. , 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 «ХП»*, Серія: *Нові рішення в сучасних технологіях*, Харків: НТУ «ХП», № 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 симпозиуму «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.

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.

Нестабільний характер роботи відновлювальних джерел енергії впливає на режими роботи електричних мереж. Нестабільність генерування ФЕС компенсується потужністю, яка надходить в РЕМ з енергосистеми. Через це умови балансування режиму РЕМ впливають і на режими ЕЕС. В умовах сьогодення забезпечення балансу покладено суто на централізовану систему електропостачання. Однак поступово відбуваються зміни в механізмах функціонування енергоринку України, що спонукають ВДЕ працювати за заданим графіком, зокрема введенням штрафів за недотримання заявленого добового графіка генерування. Для роботи за заданим графіком потрібно дослідити потенційні можливості джерел генерування щодо покриття графіків навантаження. Для забезпечення балансної надійності РЕМ визначається потужність резерву з енергосистеми або визначається ємність накопичувача електроенергії.

Подальша розбудова відновлювальних джерел енергії неможлива без використання засобів балансування та оцінювання їх впливу на надійність електричних мереж, до яких приєднуються ВДЕ. При втраті централізованого живлення в роботі отримано вирішення задачі підвищення надійності електропостачання, що ґрунтується на подачі напруги від джерела з гарантованим графіком генерування на шини фотоелектричної станції.

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.

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 character 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 in observance 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.

Key words: renewable energy sources, photoelectric power plant, instability, reliability of electric network operation, local electrical system, reserve power, power losses, small hydroelectric power station, storage, capacity

АННОТАЦИЯ

Котылко И. В. Оптимизация совместного использования разнотипных возобновляемых источников энергии для повышения надёжности работы электрических сетей. – Квалификационный научный труд на правах рукописи.

Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.14.02 «Электрические станции, сети и системы». –

Винницкий национальный технический университет, Винница, 2019.

Нестабильный характер работы возобновляемых источников энергии влияет на режимы работы электрических сетей. Нестабильность генерирования ФЭС компенсируется мощностью, поступающей в РЭС с энергосистемы. Так условия балансировки режима РЭС влияют и на режимы ЭЭС. В современных условиях обеспечение баланса возложено исключительно на централизованную систему электроснабжения. Однако постепенно происходят изменения в механизмах функционирования энергорынка Украины, побуждающие ВИЭ работать по заданному графику, в частности, введением штрафов за несоблюдение заявленного суточного графика генерации. Для работы по заданному графику нужно исследовать потенциальные возможности источников генерирования по покрытию графиков нагрузки. Для обеспечения балансной надёжности РЭС определяется мощность резерва по энергосистемы или определяется ёмкость накопителя электроэнергии.

Дальнейшее развитие возобновляемых источников энергии невозможно без использования средств балансировки и оценки влияния на надёжность электрических сетей, к которым присоединяются ВИЭ. В работе получено решение задачи повышения надёжности электроснабжения, основанное на подаче напряжения от источника с гарантированным графиком генерирования на шины фотоэлектрической станции, при потере централизованного питания.

На основе анализа суммарных графиков генерации и нагрузки в ОЭС Украины установлены зависимости уменьшения тепловой генерации и наращивание мощностей систем аккумулирования энергии для увеличения доли фотоэлектрических станций в общем балансе мощностей.

Ключевые слова: возобновляемые источники энергии, фотоэлектрическая станция, нестабильность, надёжность работы электрической сети, локальная электрическая система, мощность резерва, потери мощности, малая гидроэлектростанция, накопитель, ёмкость

Підписано до друку 18.11.2019 р. Формат 29.7 × 42 ¼

Наклад 100 прим. Зам. № 2019-

Віддруковано в комп'ютерному інформаційно-видавничому центрі
Вінницького національного технічного університету.

м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95. Тел.: 59-87-38

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р