

Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет

МАЛОГУЛКО ЮЛІЯ ВОЛОДИМИРІВНА

УДК 621.316.1: 313.322

**ОПТИМІЗАЦІЯ ФУНКЦІОНУВАННЯ ВІДНОВЛЮВАНИХ ДЖЕРЕЛ
ЕНЕРГІЇ В ЛОКАЛЬНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ СИСТЕМАХ**

Спеціальність 05.14.02 – електричні станції, мережі і системи

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Вінниця – 2015

Дисертацією є рукопис.

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

Науковий керівник кандидат технічних наук, доцент
Рубаненко Олександр Євгенович,
Вінницький національний технічний університет,
доцент кафедри електричних станцій та систем.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Артюх Станіслав Федорович,
Національний технічний університет «Харківський
політехнічний інститут»,
професор кафедри електричних станцій;

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

Захист відбудеться “06” листопада 2015 р. о 9.30 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради К 05.052.05 у Вінницькому національному технічному університеті за адресою: 21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95, ауд. 210 ГНК.

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

Автореферат розісланий “05” жовтня 2015 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради

В. В. Кулик

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Державна підтримка розбудови відновлюваної енергетики стимулює дослідження питань проектування та експлуатації відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) з метою підвищення рівня енергетичної безпеки країни та зниження впливу енергетики на довкілля. Такі джерела працюють безпосередньо в локальних електричних системах (ЛЕС), що, являють собою розподільну електричну мережу, яка приймає ознаки системи через наявність джерел виробництва електроенергії. Це призводить до поступового переходу від централізованого електропостачання до комбінованого, при якому частина електричної енергії виробляється ВДЕ.

На сьогоднішній день не повністю досліджено питання проектування та експлуатації ВДЕ в сучасних умовах, їх впливу на режими роботи електричних мереж (ЕМ), неузгодженості номінальних параметрів основного обладнання з потребами таких джерел. Відсутність типових рішень стосовно засобів захисту та автоматизації процесу виробництва електроенергії призведе до ускладнення ефективного функціонування ВДЕ в ЛЕС. В першу чергу це зумовлено нестабільністю генерування ВДЕ через природну залежність їх від впливу навколишнього середовища. Звідси виникає необхідність узгодженого електропостачання від ВДЕ і підстанцій електроенергетичної системи (ЕЕС), від якої здійснюється централізоване електропостачання. Необхідно виконувати вимоги надійності видачі електроенергії та підключати джерела максимально наближено до центрів електроспоживання. Останнє дозволить зменшити витрати на транспортування електроенергії та забезпечити її належну якість.

Таким чином, актуальну задачу оптимізації функціонування ВДЕ в локальних електричних системах можна розв'язувати як задачу проектування – для визначення оптимальної встановленої потужності, та як експлуатаційну задачу – для оптимізації добових режимів генерування відновлюваних джерел та схеми видачі електроенергії мережами локальних електричних систем з ВДЕ. Це дозволить підвищити прибутковість енергопостачальних та енергогенерувальних компаній за рахунок покращення експлуатаційних характеристик електрообладнання ЛЕС.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Основний зміст роботи становлять результати досліджень, що проводились на кафедрі електричних станцій та систем впродовж 2012-2014 років. Науково-дослідна робота проводилася відповідно до наукового напрямку кафедри та тематики науково-дослідних робіт ВНТУ за держбюджетними темами «Оптимізація функціонування електричних мереж енергосистем в умовах зростання навантаження споживачів та децентралізації їх живлення» (№ державної реєстрації 0110U002161) та «Засоби оптимізації сумісної роботи локальних електричних систем з відновлюваними джерелами енергії та систем централізованого електропостачання» (№ державної реєстрації 0113U003138).

Мета і задачі дослідження. Метою дослідження є підвищення ефективності функціонування відновлюваних джерел енергії в розподільних

електричних мережах шляхом вдосконалення методів та засобів оптимізації транспортування виробленої електроенергії.

Відповідно до вказаної в роботі мети вирішуються такі основні **задачі**:

- дослідження та аналіз нормативних документів щодо функціонування відновлюваних джерел енергії у локальних електричних системах на основі концепції *Smart Grid*;
- аналіз відомих методів оптимізації функціонування електричних мереж з відновлюваними джерелами енергії;
- розроблення методів визначення оптимальної встановленої потужності та оптимального місця приєднання відновлюваних джерел енергії у локальній електричній системі за комплексним критерієм оптимальності;
- розроблення методу оптимізації добових режимів генерування відновлюваних джерел відповідно до прогнозованого графіка навантажень локальної електричної системи;
- розроблення математичної моделі умов оптимальності конфігурації ЛЕС, а також способу та законів оптимального керування схемами видачі потужності відновлюваних джерел енергії;
- розроблення алгоритмів оптимізації встановленої потужності та місць приєднання ВДЕ у локальній електричній системі;
- розроблення алгоритму оптимізації добових режимів генерування ВДЕ відповідно до прогнозованого графіка навантажень ЛЕС;
- розроблення алгоритму оптимального керування засобами зміни конфігурації схем видачі електроенергії ВДЕ за критерієм мінімуму втрат електроенергії.

Об'єктом дослідження дисертаційної роботи є нормальні режими розподільних електричних мереж з відновлюваними джерелами енергії.

Предметом дослідження є методи і засоби оптимізації транспортування електроенергії у розподільних електричних мережах шляхом зміни схем приєднання відновлюваних джерел та оперативного керування режимами їх роботи.

Методи дослідження. Для розроблення методів визначення оптимальної встановленої потужності та оптимізації добових 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. Для розроблення структурних схем автоматизованих систем керування (АСК) ВДЕ було використано основні положення теорії автоматичного керування та теорії мікропроцесорних систем.

Наукова новизна одержаних результатів полягає у тому, що:

– вперше запропоновано аналітичні умови оптимальності схем транспортування електроенергії в локальних електричних системах за критерієм мінімуму втрат електроенергії та розроблено закони оперативного керування засобами реконфігурації схем приєднання відновлюваних джерел енергії на базі концепції *Smart Grid*, що дозволяє узгоджувати використання керованих та умовно-керованих джерел;

– вперше розроблено метод оптимізації добових графіків роботи відновлюваних джерел енергії відповідно до прогнозованого графіка навантажень за комплексним критерієм оптимальності, що враховує показники якості та втрати електроенергії. Узгодження функціонування керованих й умовно-керованих джерел дозволяє отримувати максимальний прибуток від їх експлуатації за заданий період часу;

– вдосконалено метод визначення оптимальної встановленої потужності для заданого місця приєднання відновлюваного джерела енергії в локальній електричній системі, що проявляється у використанні комплексного критерію оптимальності, який враховує показники якості та втрати електроенергії й дозволяє підвищувати техніко-економічну ефективність функціонування локальних електричних систем;

– отримав подальший розвиток метод визначення оптимального місця приєднання відновлюваного джерела енергії заданої потужності в локальній електричній системі за критерієм мінімуму втрат електроенергії, що проявляється у застосуванні коефіцієнтів розподілу втрат потужності для ранжування потенційних вузлів приєднання джерел та дозволяє отримати рішення, які забезпечують зменшення втрат електроенергії й підвищення її якості для множини ймовірних режимів електричних мереж.

Практичне значення одержаних результатів. Практична цінність роботи полягає в тому, що на підставі виконаних досліджень, розв'язана задача оптимізації функціонування відновлюваних джерел енергії в локальних електричних системах, що полягає у виборі оптимальної конфігурації схем та параметрів приєднання ВДЕ, автоматизації керування їх функціонуванням в складі локальної електричної системи, дозволяє зменшувати собівартість й збільшувати обсяги виробленої електроенергії.

За результатами проведених теоретичних досліджень вдосконалено програмний комплекс аналізу втрат електроенергії та формування електроощадних заходів в розподільних електричних мережах «ВТРАТИ-10/0,4 (РДЕ)» у напрямку аналізу ефективності функціонування електромереж 10(6)-0,4 кВ з розосередженим генеруванням шляхом доповнення алгоритмами визначення оптимальної встановленої потужності ВДЕ, визначення оптимальних місць їх приєднання за критерієм мінімуму втрат потужності в розподільних електричних мережах.

Використовуючи отримані у роботі умови оптимальності, методи та алгоритми вдосконалено комплекс програм інтелектуальної підтримки дій диспетчера розподільних електричних мереж, який передано для дослідної експлуатації до ПАТ «Вінницяобленерго» (довідка про впровадження від 08.09.2014 р.). Під час дослідної експлуатації встановлено, що за рахунок

прийняття обґрунтованих рішень щодо місць та параметрів приєднання відновлюваних джерел енергії до ЕМ 10 кВ з урахуванням технічних втрат електроенергії та параметрів її якості, можна досягти зменшення втрат в окремих ЕМ на 5–10%, а також забезпечити нормативні відхилення напруги. Результати досліджень впроваджено в навчальному процесі Вінницького національного технічного університету для підвищення якості лекційних та лабораторних занять (довідка про впровадження від 22.09.2014 р.).

Особистий внесок здобувача. Всі наукові положення, які є основним змістом дисертаційної роботи, розроблено та обґрунтовано здобувачем особисто. У роботах, що опубліковано у співавторстві, внесок автора наступний. В [1] показано переваги формування інтелектуальних електричних мереж, відповідно до концепції *Smart Grid*, використання яких дозволяє створити передумови для ефективної експлуатації ВДЕ. В [2] систематизовано досвід розв'язання задач оптимізації розподільних електричних мереж з ВДЕ розглянуті задачі та досліджено можливості застосування відомих підходів для оптимізації режимів ЛЕС, запропоновано цільову функцію для оптимізації режиму ЛЕС з ВДЕ, що дозволяє враховувати зміни втрат та якості електроенергії. В [3] запропоновано математичну модель оптимального розподілу активного та реактивного навантаження електричних мереж між ВДЕ та отримано метод формування перспективного плану розвитку електричних мереж з поетапним визначенням оптимальних місць приєднання ВДЕ. В [4] запропоновано метод визначення оптимальної потужності та місць приєднання ВДЕ до розподільних електричних мереж, що покладений в основу алгоритму програмного забезпечення систем керування їх режимами. В [5] запропоновано алгоритм визначення узагальненого показника ефективності експлуатації електричної мережі за критерієм мінімуму втрат електроенергії та алгоритм визначення оптимальної встановленої потужності ВДЕ. В [6] запропоновано спосіб визначення узагальнених показників ефективності проектних рішень щодо схеми транспортування електроенергії ВДЕ у ЛЕС. В [7] показано переваги розроблення єдиного стандарту, який би регламентував приєднання ВДЕ на паралельну роботу з електроенергетичною системою України, в контексті впровадження технологій концепції *Smart Grid*. В [8] показано переваги розвитку інформаційної інфраструктури та інтелектуалізації систем керування з використанням *Smart Grid*. В [9] показано необхідність розроблення єдиного стандарту, який би регламентував приєднання ВДЕ на паралельну роботу з ЕЕС України. В [10] підтверджено ефективність методу узгодження графіків генерування ВДЕ з місцевим електроспоживанням шляхом оперативного керування режимами роботи розосередженого генерування без погіршення їх прибутковості.

Результати досліджень, що викладені у [1–10], були отримані у Вінницькому національному технічному університеті.

Апробація результатів дисертації. Головні результати дисертаційної роботи доповідалися та обговорювалися: на XXX науково-технічній конференції «Моделювання» (м. Київ, 2011 р.); на XII та XV Міжнародних науково-практичних конференціях «Відновлювальна енергетика XXI століття»

(АР Крим, 2011 р., м. Київ, 2014 р.); на I та II Міжнародних науково-технічних конференціях «Оптимальне керування електроустановками» (м. Вінниця, 2011, 2013 р.р.); на IV та V Міжнародних науково-технічних конференціях «Підвищення рівня ефективності енергоспоживання в електротехнічних пристроях і системах» (м. Луцьк – Шацькі озера, 2012, 2014 р.р.); на XII Міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми сучасної електротехніки» (м. Вінниця, 2012 р.); на XI Міжнародній науково-технічній конференції «Контроль і управління в складних системах» (м. Вінниця, 2012 р.); на науково-технічних семінарах НАН України «Електричні мережі енергосистем з нетрадиційними і відновлюваними джерелами енергії», (м. Вінниця, 2013, 2014 р.р.); на VI Міжнародній науково-технічній конференції «Керування режимами роботи об'єктів електричних та електромеханічних систем – 2013» (м. Донецьк, 2013 р.); на VI міжнародній науково-технічній конференції «Енергетика. Екологія. Людина» (м. Київ, 2014 р.).

Публікації. За матеріалами дисертаційної роботи опубліковано 11 робіт, з них: 5 статей у наукових фахових виданнях, що включені до наукометричних баз даних, 4 статті у збірниках матеріалів міжнародних конференцій та дві статті в інших виданнях України.

Структура й обсяг роботи. Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел (105 найменувань) та додатків. Повний обсяг дисертації – 158 сторінок. Основний зміст викладено на 128 сторінках друкованого тексту, містить 37 рисунків та 4 таблиці.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовані мета та задачі дослідження. Вказано наукову новизну та практичну цінність отриманих результатів. Наведено відомості про апробацію роботи, особистий внесок здобувача і публікації. Зазначено зв'язок роботи з науковими програмами, темами.

У **першому розділі** проаналізовано проблеми оптимізації функціонування відновлюваних джерел енергії в ЛЕС. Приділено увагу питанням формування інтелектуальних електричних мереж, досліджено принципи функціонування локальних електричних систем з ВДЕ в концепції *Smart Grid*. Проаналізовано світовий досвід та виконано порівняльний аналіз стандартів функціонування інтелектуальних локальних енергосистем та інтеграції їх в системи централізованого електропостачання. Досліджено та систематизовано досвід розв'язання задач оптимізації режимів роботи ВДЕ в розподільних мережах. Досліджено особливості ВДЕ, як об'єкта керування, а також методи оптимізації їх функціонування в ЛЕС.

Зростання частки ВДЕ ставить питання про поступовий перехід від традиційних технологій, що передбачають використання централізованого генерування електричної енергії, до нових рішень, які орієнтовані на широке застосування ВДЕ та активних мереж, що здатні надавати послуги з передавання, зберігання та перетворення електричної енергії. На сьогоднішній

день всі аспекти створення подібних «розумних» енергосистем розглядаються в концепції *Smart Grid* – найбільш відомій концепції модернізації електричних мереж. У багатьох країнах застосовується низка стандартів *Smart Grid* для засобів релейного захисту, контролю та моніторингу магістральних та розподільних мереж. Порівняльний аналіз вказаних стандартів показав доцільність розв'язання комплексу задач оптимізації функціонування ВДЕ в локальних електричних системах з урахуванням показників якості та втрат електроенергії з подальшим переходом до єдиного стандарту. Це розширить можливості застосування ВДЕ та можливості споживачів, а також дозволить виконувати оптимізацію функціонування ЛЕС з огляду на покращення взаємодії всіх суб'єктів системи в режимі реального часу.

Дослідження та аналіз методів оптимізації функціонування ВДЕ в локальних електричних системах показали, що для зменшення втрат електроенергії та покращення показників її якості доцільно переходити до розв'язання комплексної задачі оптимізації схеми ЛЕС, що передбачає реалізацію ефективних проектних рішень та впровадження систем оперативної реконфігурації схем приєднання ВДЕ.

Оптимізація функціонування ВДЕ у локальних електричних системах шляхом реконфігурації передбачає застосування автоматизованих систем керування. Таким чином, необхідно дослідити можливість і доцільність використання автоматизованої системи оптимального керування комплексами ВДЕ для підвищення ефективності функціонування розподільних ЕМ з використанням технології *Smart Grid*. Застосування адаптивних АСК дозволяє підтримувати належну якість технологічного процесу в умовах неповної та недосконалої вихідної інформації, що характерно для експлуатації ВДЕ в локальних електричних системах.

Для розв'язання комплексу задач оптимізації функціонування відновлюваних джерел енергії в ЛЕС, встановлення єдиних критерію та умов оптимальності є недоцільним. Функціонування ВДЕ має здійснюватися за законами керування, які формуються за загальною концепцією, але в залежності від експлуатаційної ситуації.

Показано, що розроблення та впровадження способу оперативної оптимізації схем видачі електроенергії ВДЕ до електричних мереж з використанням аналітичних умов оптимальності за комплексним критерієм, що враховує параметри якості електроенергії та понаднормативні втрати, дозволить забезпечувати оптимальність нормальних режимів ЛЕС в темпі процесу з урахуванням сучасних вимог до технологічного процесу.

У **другому розділі** досліджено задачі оптимізації функціонування ВДЕ у локальній електричній системі за комплексним критерієм оптимальності. Розроблено математичну модель для оцінювання чутливості втрат потужності в ЛЕС до зміни місця приєднання ВДЕ. Розроблено метод визначення оптимальної встановленої потужності ВДЕ та метод визначення оптимального місця їх приєднання. Запропоновано метод оптимізації добових режимів генерування ВДЕ в локальній електричній системі за комплексним критерієм, що враховує показники якості та втрати електроенергії. Запропоновано

аналітичні умови оптимальності схеми ЛЕС з відновлюваними джерелами енергії за критерієм мінімуму втрат електроенергії.

Враховуючи специфіку забезпечення прибутковості ЛЕС, доцільно розв'язувати задачу визначення оптимальної потужності умовно-керованих відновлюваних джерел енергії $P_j^{\text{ВДЕ}}$, $j = 1, 2, \dots, n$ за комплексним критерієм, який враховує умови багатоступеневого тарифу енергоринку α_j та показники ефективності функціонування ЛЕС. У якості складових комплексного критерію для забезпечення максимальних надходжень від реалізації електроенергії ВДЕ, доцільно використовувати показники якості електроенергії та втрати на її транспортування мережами ЛЕС. В залежності від поставленої мети вказану задачу можна розв'язувати, як задачу проектування – для визначення оптимальної встановленої потужності ВДЕ, та як експлуатаційну – для оптимізації добових режимів роботи ВДЕ, відповідно до прогнозованого графіка навантажень ЛЕС.

Для розв'язання першої задачі доцільно скористатись виразом сумарного прибутку від функціонування ВДЕ, що поєднані на паралельну роботу в ЛЕС:

$$\Pi^{\text{ВДЕ}} = \sum_{j=1}^n \left[\alpha_j \cdot P_j^{\text{ВДЕ}} \cdot k_{\text{в}j} \cdot T \right], \quad (1)$$

де $P_j^{\text{ВДЕ}}$ – встановлена потужність j -го ВДЕ; α_j – тариф на електроенергію для j -того ВДЕ («зелений тариф»); $k_{\text{в}j}$ – коефіцієнт використання встановленої потужності j -го ВДЕ; T – тривалість звітнього періоду.

З урахуванням (1) цільову функцію задачі оптимізації встановленої потужності відновлюваних джерел енергії в ЛЕС запропоновано подати так:

$$\alpha = \Pi^{\text{ВДЕ}} \cdot e^{-z_1} \cdot e^{-z_2} \rightarrow \max, \quad (2)$$

за обмеження:

$$\sum_{j=1}^n P_j^{\text{ВДЕ}} - \sum_{g=1}^m P_{\text{нг}} \leq P_{\text{гр}}, \quad (3)$$

де e^{-z_1} , e^{-z_2} – рівняння регресії, які характеризують вплив складових критерію оптимальності функціонування; $z_1 = k_1 \cdot (1 - \bar{P}(U_{\text{доп}}, T))$ – показник степені рівняння регресії, який враховує обмеження прибутку від функціонування ВДЕ за критерієм якості електроенергії; $z_2 = k_2 \cdot (1 - \bar{P}(\Delta W_{\text{доп}}, T))$ – показник степені рівняння регресії, який враховує обмеження прибутку від функціонування ВДЕ за критерієм втрат електроенергії на її транспортування; k_1 , k_2 – вагові коефіцієнти рівнянь регресії, для узгодження впливу частинних критеріїв оптимальності на результати оптимізації (в роботі аналітично показано доцільність встановлення $k_1=0,288$ та $k_2=0,163$); $\bar{P}(U_{\text{доп}}, T)$ – імовірність забезпечення нормативного відхилення напруги для заданого звітнього періоду T ; $\bar{P}(\Delta W_{\text{доп}}, T)$ – імовірність забезпечення нормативних втрат електроенергії для заданого звітнього періоду T ; $P_{\text{нг}}$ – потужність навантаження g -го вузла споживання, $g = 1, 2, \dots, m$; $P_{\text{гр}}$ – пропускна здатність електричних мереж ЛЕС, що обмежується найбільш «слабкою» ділянкою мережі.

Розв'язком задачі оптимізації (2) – (3) буде оптимальне значення встановленої потужності ВДЕ в мережі за умов багатоступеневого тарифу енергоринку c_j та дотримання обмежень на пропускну здатність ліній електропередачі та якість електроенергії в ЛЕС.

Для розв'язання задачі оптимізації добових режимів роботи відновлюваних джерел енергії $P_j^{BDE}(t), j = 1, 2, \dots, n$ (наприклад МГЕС) відповідно до прогнозованого графіка навантажень ЛЕС на інтервалі часу $[t_0; t_k]$ з урахуванням режимів умовно-керованих джерел, вираз (1) набув вигляду:

$$\Pi^{BDE}(t) = \int_{t_0}^{t_k} \left[\sum_{j=1}^n c_j \cdot P_j^{BDE}(t) \right] dt + \sum_t M_{\Pi,t}, \quad (4)$$

де $M_{\Pi,t}$ – математичне сподівання сумарного прибутку від функціонування сукупності умовно-керованих джерел енергії – ВЕС та СЕС.

Розв'язком задачі оптимізації (2) - (3) з використанням (4) будуть оптимальні значення потужностей генерування окремих ВДЕ P_j^{BDE} відповідно до прогнозованого графіку навантажень ЛЕС за комплексним критерієм оптимальності функціонування. Для чисельного розв'язання вказаних задач за заданої сукупності вхідних даних (поточного вектору стану системи) було використано метод покоординатного спуску. Алгоритмічну реалізацію та приклади розв'язання вказаної задачі подано у розділі 3.

Для визначення оптимального місця приєднання ВДЕ, потужність якого розраховано з (2) – (3), отримав розвиток метод оптимізації приєднання відновлюваних джерел в розподільних електричних мережах за критерієм мінімуму втрат електроенергії. В ньому використано матрицю коефіцієнтів розподілу втрат потужності $\dot{\mathbf{T}}$ у вітках заступної схеми мережі між її вузлами. Для забезпечення однозначності ранжування потенційних вузлів приєднання ВДЕ матрицю $\dot{\mathbf{T}}$ доцільно перетворити у вектор вагових коефіцієнтів, що являють собою сумарні коефіцієнти розподілу втрат потужності по вітках схеми ЛЕС:

$$\dot{\mathbf{T}}_{\Sigma} = \dot{\mathbf{T}}_t \cdot \mathbf{n}_v, \quad (5)$$

де $\dot{\mathbf{T}}_t$ – транспонована матриця коефіцієнтів розподілу втрат потужності; \mathbf{n}_v – одиничний вектор стовпець, який має розмірність за кількістю віток схеми ЕМ. Вектор $\dot{\mathbf{T}}_{\Sigma}$ має розмірність за кількістю вузлів у ЛЕС. Кожен елемент вектора відповідає частці втрат, що зумовлена перетіканням потужності ВДЕ від відповідного вузла ЕМ до основного центру живлення (базисного вузла).

Використання вектора вагових коефіцієнтів (5) дозволяє визначити вузол ЕМ, в якому приєднання ВДЕ заданої потужності призведе, з певними допущеннями, до найменшої зміни втрат потужності, або до максимального зниження втрат.

В роботі показано, що вектор $\dot{\mathbf{T}}_{\Sigma}$ складається з елементів $\dot{T}_{\Sigma j}$, які є коефіцієнтами чутливості. Вони встановлюють зв'язок між приростом втрат потужності у ЛЕС та змінами потужності у вузлах ВДЕ. Коефіцієнти чутливості

$T'_{\Sigma j}$ є фактично постійними за умови пропорційних змін генерування та навантаження у вузлах ЛЕС, відповідно до графіків навантажень її добових режимів. Приріст коефіцієнта чутливості $\delta T'_{\Sigma j}$ для заданих значень потужностей за рахунок зміни напруг у вузлах схеми засобами регулювання не буде перевищувати 5%. Тому, зважаючи на досягнуто точність вихідних даних щодо параметрів режиму ЛЕС та паспортних даних електрообладнання, для задач проектування, вказана точність є допустимою та достатньою для вибору оптимального місця приєднання відновлюваних джерел енергії у ЛЕС.

Отже, відносна статичність коефіцієнтів чутливості $T'_{\Sigma j}$ дозволяє, ще на етапі вибору варіантів проектних рішень, визначати оптимальні вузли приєднання потужностей ВДЕ, які практично не залежать від змін режиму локальної електричної системи та ВДЕ в ній.

За певних умов підключення ВДЕ може призводити до зміщення точки поточкорозподілу в ЛЕС і, таким чином, зміни числових значень коефіцієнтів розподілу втрат потужності T_{Σ} у широкому діапазоні. У таких випадках необхідне уточнення умов оптимальності конфігурації ЛЕС з відновлюваними джерелами енергії за критерієм мінімуму втрат електроенергії. Для вирішення завдання використано вектор коефіцієнтів розподілу втрат потужності, сформульовано та розв'язано задачу реконфігурації локальної електричної системи з ВДЕ за вказаним критерієм: мінімізувати:

$$\Delta P = \sum_{j=1}^n P_j (T'_{\Sigma j} - T''_{\Sigma j} \cdot \operatorname{tg} \varphi_j) + \Delta P_{\text{ЦЖ}} + \Delta P_{\text{УК}} \rightarrow \min \quad (6)$$

з урахуванням балансових обмежень:

$$\sum_{j=1}^n P_j - P_{\text{ЦЖ}} = 0; \quad \sum_{j=1}^n (P_j \cdot \operatorname{tg} \varphi_j) - Q_{\text{ЦЖ}} = 0, \quad (7)$$

де P_j – потужність керованого ВДЕ або споживача, $j = 1, 2, \dots, n$; $\operatorname{tg} \varphi_j$ – доцільне співвідношення реактивної та активної потужностей джерела енергії або споживача; $\Delta P_{\text{ЦЖ}}$ – втрати активної потужності в ЕМ, що викликані перетіканнями від центру живлення; $\Delta P_{\text{УК}}$ – втрати активної потужності в ЕМ, що викликані перетіканнями від умовно-керованих ВДЕ; $T'_{\Sigma j}$, $T''_{\Sigma j}$ – дійсна та уявна складові коефіцієнту розподілу втрат активної потужності для j -го вузла; $P_{\text{ЦЖ}}$, $Q_{\text{ЦЖ}}$ – активна та реактивна потужності, що надходять до ЕМ із основного центру живлення.

Розв'язання задачі (6) – (7) методом невизначених множників Лагранжа дозволило отримати аналітичні умови оптимальності конфігурації ЛЕС за критерієм мінімуму втрат електроенергії, що полягають у рівності коефіцієнтів розподілу втрат потужності для окремих вузлів ЕМ:

$$T'_{\Sigma j} = -\lambda_P = \text{idem}, \quad T''_{\Sigma j} = \lambda_Q = \text{idem}. \quad (8)$$

З отриманого розв'язку видно, що оптимальними змінами у конфігурації ЛЕС, або в режимі функціонування ВДЕ за вказаним критерієм є такі, що наближають коефіцієнти розподілу втрат потужності до середнього значення.

Оскільки запропоновані показники \mathbf{T}'_{Σ} , \mathbf{T}''_{Σ} є багатомірними, то без додаткових умов не дають можливості однозначного оцінювання ефективності реконфігурації. Тому було запропоновано узагальнений показник для вибору варіанту шляхом приведення векторів \mathbf{T}'_{Σ} , \mathbf{T}''_{Σ} до вигляду числа евклідової норми:

$$dP' = |\mathbf{T}'_{\Sigma}| = \left[\sqrt{\sum_{j=1}^n T_{\Sigma j}'^2} \right]; \quad dP'' = |\mathbf{T}''_{\Sigma}| = \left[\sqrt{\sum_{j=1}^n T_{\Sigma j}''^2} \right]. \quad (9)$$

Довжини векторів dP' , dP'' вимірюються в відносних одиницях і мають фізичний зміст модулів втрат, що зумовлені перетіканнями активної та реактивної потужностей ВДЕ по відношенню до означених складових потужностей. Вони можуть бути використані як індикатор впливу параметрів окремого вузла або вітки заступної схеми ЕМ з ВДЕ на оптимальність її функціонування.

Використовуючи розроблені моделі та методи розв'язано задачу підвищення ефективності функціонування ВДЕ в розподільних електричних мережах з урахуванням експлуатаційних умов.

У **третьому розділі** розроблено алгоритми для визначення оптимальної встановленої потужності ВДЕ, визначення оптимального місця їх приєднання, а також оптимізації добових режимів генерування відновлюваних джерел енергії в ЛЕС. Запропоновано спосіб оптимізації добових режимів генерування ВДЕ та споживачів енергії в ЛЕС. Запропоновано закон оптимального керування та алгоритм функціонування засобів реконфігурації схеми видачі потужності. Результати використано для модифікації програмного комплексу аналізу ефективності функціонування електромереж «ВТРАТИ-10/0,4 (РДЕ)».

Відповідно до запропонованих методів визначення оптимальної встановленої потужності ВДЕ та методів оптимізації добових режимів їх генерування в локальній електричній системі, розроблено алгоритми, що базуються на використанні чисельних методів покоординатного спуску. Оптимальний розв'язок отримують шляхом розрахунку низки усталених режимів з різними значеннями встановленої потужності ВДЕ, що належать до заданого діапазону.

Оптимальне місце приєднання ВДЕ з заданою встановленою потужністю, наприклад, розрахованою за розробленим методом, визначається за критерієм мінімуму втрат електроенергії. Алгоритм полягає у використанні коефіцієнтів розподілу втрат потужності для можливих вузлів приєднання, як вагових коефіцієнтів цих вузлів. Тоді найменша вага відповідає оптимальному варіанту.

Блок-схему алгоритму визначення оптимального місця приєднання ВДЕ показано на рис. 1. Алгоритм передбачає введення початкових даних характерного режиму ЛЕС для створення розрахункової моделі та формування переліку вузлів θ_v до яких можливе приєднання ВДЕ.

Залежно від встановленої потужності ВДЕ передбачено два варіанти визначення оптимального місця приєднання. Якщо встановлена потужність ВДЕ не перевищує сумарну потужність навантаження споживачів ЛЕС ΣP_n , то оптимальне місце приєднання вибирається за критерієм мінімуму коефіцієнтів

розподілу втрат потужності. В іншому випадку перетікання від ВДЕ будуть спрямовані до центру живлення, що призведе до підвищення втрат потужності в ЛЕС. Тоді оптимальне місце приєднання визначається за критерієм мінімуму узагальненого показника ефективності dP' від перетікань активної потужності.

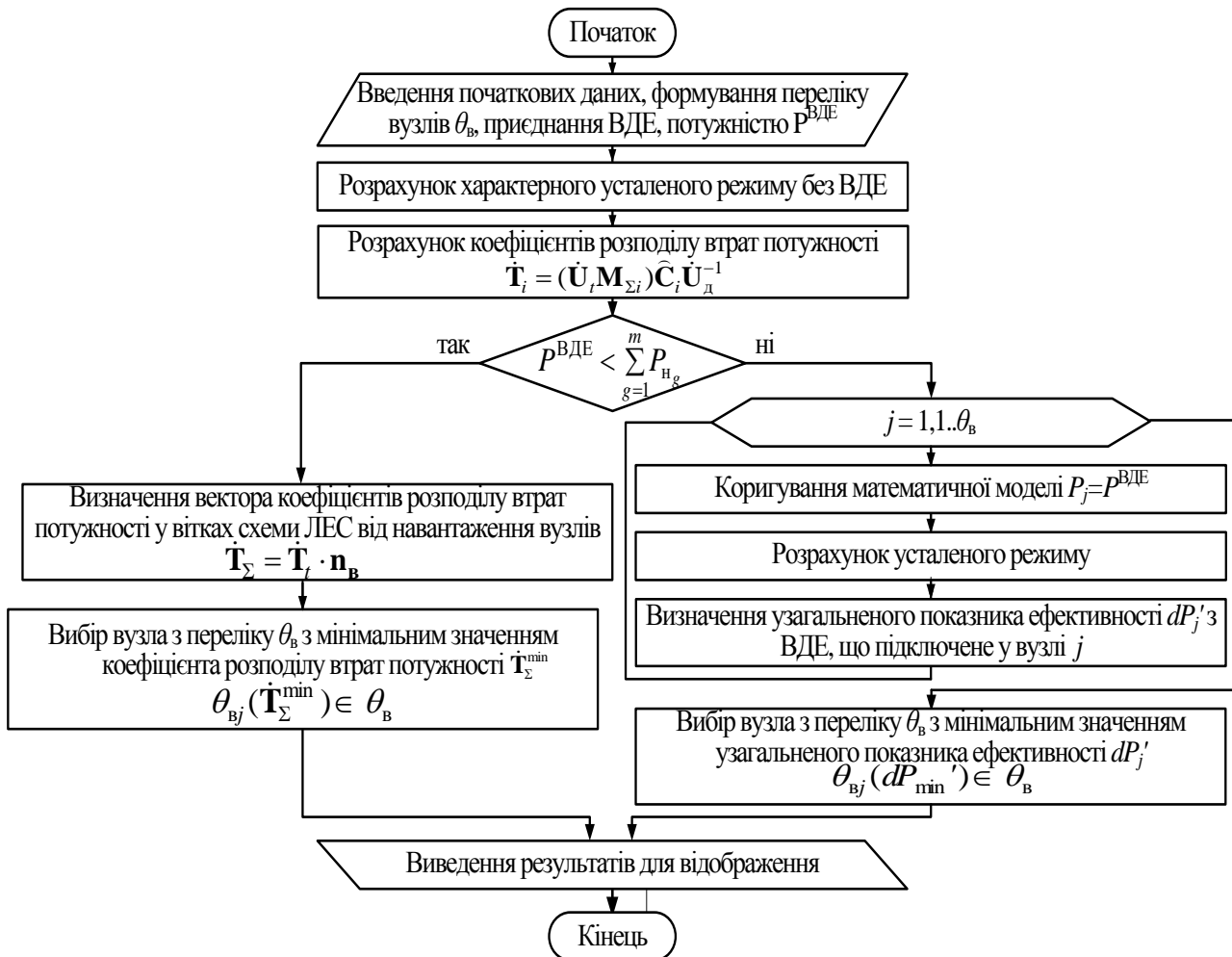


Рисунок 1 – Алгоритм визначення оптимального місця приєднання ВДЕ у ЛЕС

Застосування такого підходу дозволяє отримати рішення, яке практично не залежить від змін режиму ЕМ і забезпечує зменшення втрат електроенергії та підвищення якості напруги для сукупності ймовірних режимів ЛЕС.

Для узгодження графіків генерування СЕС з локальним електроспоживанням в роботі запропоновано спосіб оперативного керування схемою приєднання інверторів, тобто зміни схеми видачі потужності до ЕМ. Залежно від поточної потужності СЕС та навантаження споживачів на регульовану систему шин (СШ) підключається кількість інверторів, які здатні забезпечити споживання у ЛЕС з дотриманням показників якості та мінімальних втрат електроенергії. Надлишок виробленої електроенергії видається напряму до центру живлення, який окремим фідером підключено до іншої, нерегульованої системи шин. Для реалізації способу передбачається використання електронних ключів відповідної потужності або керованого комутаційного обладнання 0,4 кВ, встановленого у силовій шафі (ШС). Крім

того необхідно встановити автомати зворотної потужності (АЗП). Головна схема з'єднань сонячної електростанції, що подана на рис. 2, дозволить оперативно узгоджувати графіки видачі потужності на одній з систем шин з локальним навантаженням за рахунок автоматичного перерозподілу потужностей з виходів інверторів між секціями шин. Для цього використовується мікропроцесорний пристрій локальної САК та канал зв'язку з оперативно-інформаційним комплексом ЛЕС.

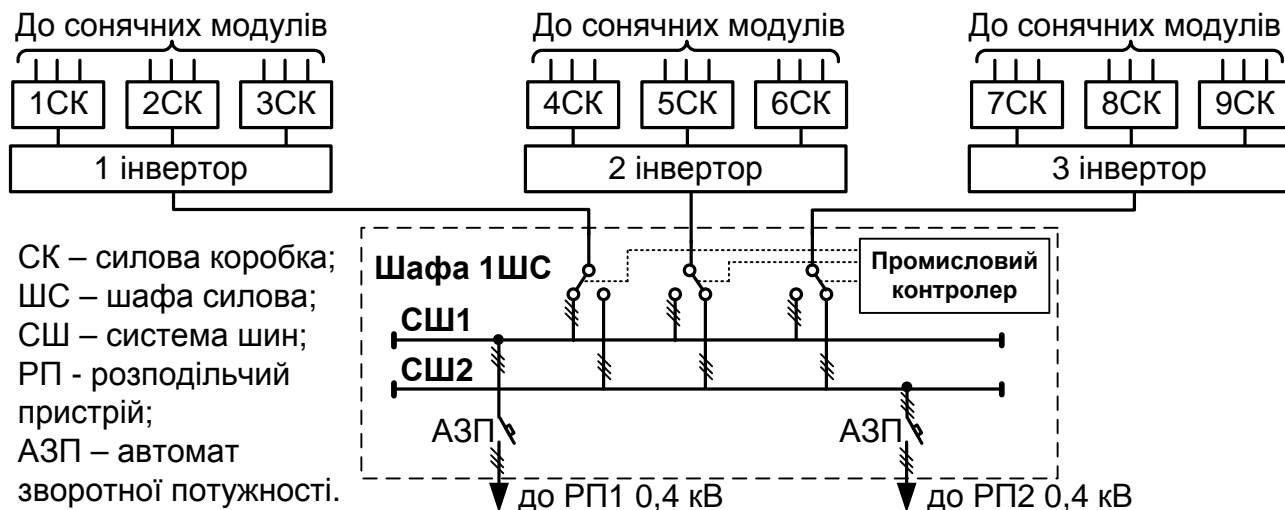


Рисунок 2 – Головна схема з'єднань сонячної електростанції з резервованою та керованою видачею потужності

Для реалізації запропонованого способу узгодження графіків генерування СЕС з локальним електроспоживанням в роботі запропоновано закон оптимального керування комутаційними апаратами системи реконфігурації схеми видачі потужності. Для зменшення втрат електроенергії в електричній мережі пропонується вимірювати струм на шині високої напруги сонячної електростанції та, в залежності від значення оптимальної потужності, що визначена за алгоритмом оптимізації добових режимів генерування ВДЕ, змінювати кількість інверторів $N_{\text{в}}$, що підключені на першу або другу систему шин для підтримання напруги на шині в області допустимих значень.

Кожен додатковий інвертор буде вмикатися на регульовану систему шин, якщо відхилення струму $\Delta i(t)$ буде нижче за нижню межу зони нечутливості ($\Delta i(t) = -6\text{ А}$, а $i_{\text{вз}} = -5\text{ А}$), напруга менша за максимальну, кількість ступенів не перевищує максимальної, а виміряний струм ВДЕ має тенденцію до зменшення. І навпаки, якщо відхилення струму $\Delta i(t)$ буде вище за верхню межу зони нечутливості ($\Delta i(t) = +6\text{ А}$, а $i_{\text{вз}} = +5\text{ А}$), напруга вища за максимальну, кількість ступенів не менша мінімальної, а виміряний струм ВДЕ матиме тенденцію до збільшення, буде виконуватись перемикання інвертора з регульованої на нерегульовану систему шин. У відповідності з викладеним обґрунтуванням закон керування має вигляд (10):

$$\Delta i(t) = K_1 \left[(I(t) - I_{уст}) - K_2 (U(t) - U_{уст}) \right];$$

$$N_B = \begin{cases} n(t) + 1, & \text{якщо} \\ n(t), & \text{при } i_{н.3} < \Delta i(t) < i_{в.3}; \\ n(t) - 1, & \text{якщо} \end{cases} \quad (10)$$

$$\begin{cases} \Delta i(t) \leq i_{н.3}; \\ \Delta i(t - \tau_3) \leq i_{н.3}; \\ U(t) \leq U_{max}; \\ \frac{dI_{ор}}{dt} \leq 0; \\ n(t) + 1 \leq n_{max}; \end{cases} \quad \begin{cases} \Delta i(t) \geq i_{в.3}; \\ \Delta i(t - \tau_3) \geq i_{в.3}; \\ U(t) \geq U_{min}; \\ \frac{dI_{ор}}{dt} \geq 0; \\ n(t) - 1 \geq 0; \end{cases}$$

де N_B – кількість інверторів, що підключені на регульовану систему шин; $I_{уст}$ – уставка по струму, що відповідає оптимальній потужності ВДЕ та коригується в залежності від параметрів режиму ЛЕС, відпускної ціни тощо; $U_{уст}$ – уставка по напрузі на шинах ВДЕ, дорівнює номінальній напрузі, або іншому значенню, якщо ВДЕ приймає участь у регулюванні напруги в ЛЕС; $I(t)$, $U(t)$, $n(t)$ – виміри струму та напруги, а також кількість увімкнених інверторів у момент часу t ; K_1 – коефіцієнт підсилення, що визначає чутливість регулятора до відхилення струму; K_2 – еквівалентна провідність для перерахунку відхилення напруги від уставки в еквівалентне

відхилення струму від оптимального (це забезпечує реакцію системи на перевищення напруги у випадку, коли струм відповідає області оптимальності); $\Delta i(t)$ – відхилення струму від оптимального з урахуванням зміни напруги на шинах ВДЕ; $I_{ор}$ – огинаюча сумарного струму інверторів $I(t)$; τ_3 – час затримки сигналу; t – момент часу, для якого здійснюється регулювання; n_{max} – максимальна кількість інверторів, що можуть бути увімкнені на регульовану систему шин.

У **четвертому розділі** на прикладах реальних відновлюваних джерел та розподільних електричних мереж показано працездатність та ефективність методів й алгоритмів, що запропоновані в роботі. Виконано практичні розрахунки з визначення оптимальної встановленої потужності ВДЕ та оптимального місця їх приєднання. Адекватність результатів теоретичних досліджень та висновків перевірено на прикладах Слобода-Бушанської та Цекинівської СЕС, які на даний час введені в експлуатацію і видають потужність до енергоринку електричними мережами 10 кВ Ямпільського та Могилів-Подільського районів.

Для визначення встановленої потужності ВДЕ за комплексним критерієм оптимальності з урахуванням якості електроенергії та мінімуму втрат, було використано розроблений метод на прикладі Цекинівської СЕС. Остання вводилась у експлуатацію трьома чергами: Цекинівська СЕС №1: 1,43 МВт; Цекинівська СЕС №2: 1,43 МВт; Цекинівська СЕС №3: 0,25 МВт. Електроенергія видається безпосередньо в електричну мережу 10 кВ через

фідери Ф-31 (перша черга) з проміжними відборами потужності та Ф-35 (друга та третя черга) без проміжних відборів (підстанція 35/10 кВ «Слобода-Підлісівська»). Результати розрахунку подано у табл. 1.

Таблиця 1 – Результати розрахунку оптимальної встановленої потужності першої черги Цекинівської СЕС за комплексним критерієм

Цекинівська СЕС №1, кВт	$P_{ВДЕ}$, млн. грн/рік	$\bar{P}(U_y, T)$, в.о.	$\bar{P}(\Delta W_H, T)$, в.о.	$\Delta W_{факт}$, %	Ц, млн. грн/рік
1430	73,3	1	0,38	8,47	66,2
1680	86,1	1	0,42	8,21	78,4
2080	93,8	1	0,47	7,9	86,1
2710	105,6	0,6	0,35	9,2	84,7

Як видно з результатів дослідження, оптимальним за комплексним критерієм приєднання до фідера Ф-31 є значення встановленої потужності 2080 кВт. Збільшення встановленої потужності призводить до імовірного зниження якості напруги, що погіршує умови функціонування локальної електричної системи.

Для перевірки адекватності запропонованих аналітичних умов оптимальності конфігурації ЛЕС за критерієм мінімуму втрат електроенергії, а також підтвердження ефективності вдосконаленого методу визначення оптимальних місць приєднання ВДЕ, використано приклад локальної електричної системи з ВДЕ Слобода-Бушанського комплексу зі встановленою потужністю СЕС 1881 кВт та МГЕС 250 кВт. В процесі розрахунків виявлено, що встановлена потужність ВДЕ перевищує оптимальне значення. Тому для визначення оптимального місця приєднання доцільно скористатись узагальненим показником ефективності dP' (9). Результати розрахунків подано на рис. 3, а.

Встановлено, що для даної конфігурації ЛЕС діапазон потужностей ВДЕ які доцільно експлуатувати у ній, становить біля 400 кВт. Також встановлено, що оптимізація схеми видачі електроенергії з використанням узагальнених показників dP' , dP'' дозволяє отримати рішення, що забезпечують дотримання умов забезпечення якості електроенергії, наприклад за середньоквадратичним відхиленням умов забезпечення якості напруги σ_U в мережі (рис. 3, б).

Співвідношення добових режимів генерування ВДЕ та споживання енергії в локальній електричній системі подано на рис. 4, а. Результати розрахунку оптимальних керувальних впливів на прикладі Цекинівської СЕС представлено у вигляді графіка зміни кількості інверторів, які можуть бути увімкнені на регульовану систему шин (фідер Ф-31) протягом доби (рис. 4, б). За результатами обчислювального експерименту відзначено зниження втрат потужності в ЛЕС для характерних режимів (до 10%).

Таким чином, запропоновані в роботі способ та алгоритми оптимізації добових режимів генерування ВДЕ та споживачів енергії в ЛЕС можуть бути ефективно використані для зниження втрат потужності в розподільних мережах, а у поєднанні з локальним регулятором, забезпечують можливість автоматизації даного процесу.

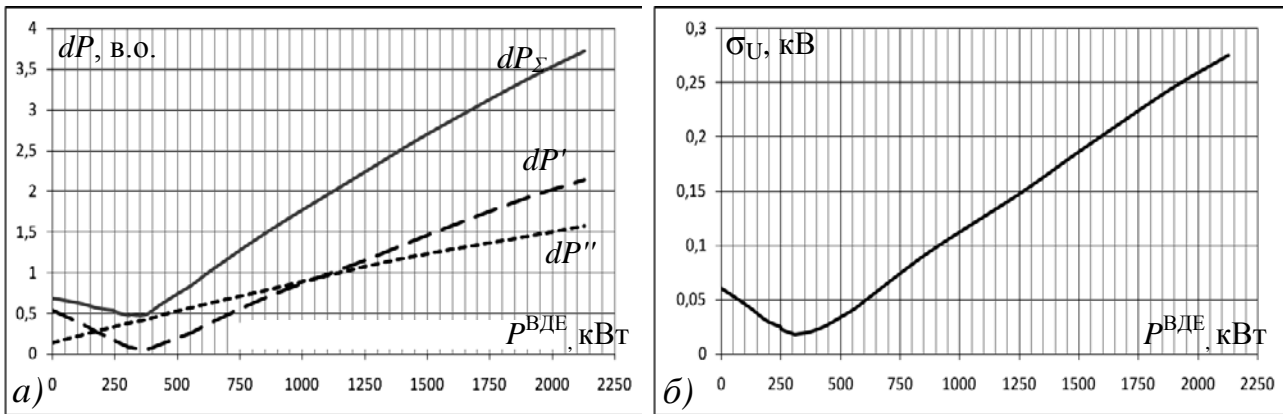


Рисунок 3 – Залежності узагальнених показників ефективності ЛЕС Ямпільського району від встановленої потужності Слобода-Бушанського комплексу ВДЕ

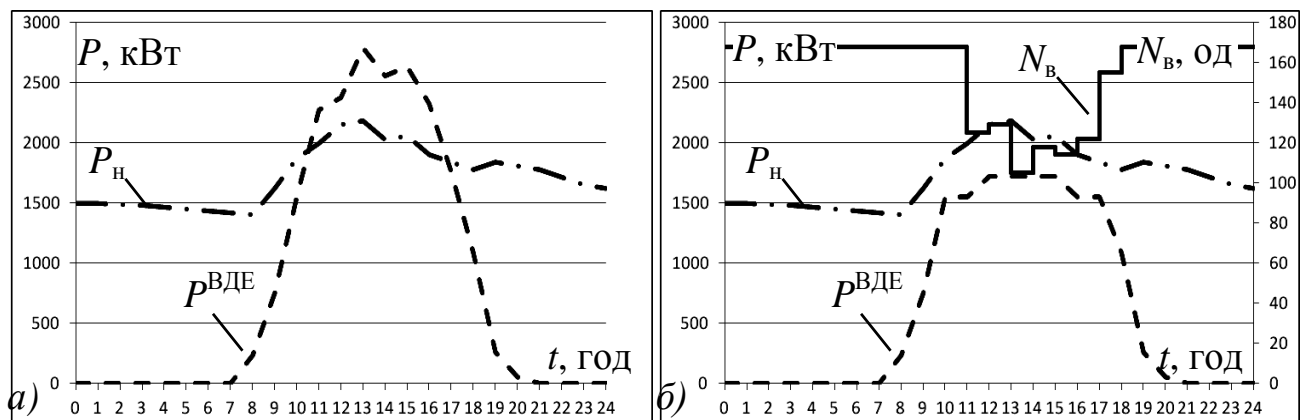


Рисунок 4 – Результати оптимізації добових режимів генерування ВДЕ та споживачів енергії в ЛЕС на прикладі Цекинівської СЕС

ВИСНОВКИ

В роботі отримано нове вирішення актуальної науково-прикладної задачі оптимізації функціонування відновлюваних джерел енергії у локальних електричних системах, що полягає у визначення оптимальної встановленої потужності ВДЕ, у виборі оптимальних схем їх приєднання, а також в автоматизації оптимального керування їх роботою в складі електричної системи та дозволяє зменшувати втрати на транспортування електроенергії та покращувати її якість.

Проведені дослідження дозволили отримати такі результати:

1. Систематизовано та досліджено можливості комплексного застосування ВДЕ для оптимізації режимів локальних електричних систем. Показано, що в якості критеріїв оптимальності режимів ЛЕС доцільно використовувати комплексний критерій максимуму прибутку від реалізації виробленої електричної енергії ВДЕ, з урахуванням їх впливу на роботу ЕМ.

2. Застосування розроблених методів оптимізації встановленої потужності для заданого місця приєднання ВДЕ в локальній електричній системі та методу оптимізації добових графіків роботи відновлюваних джерел

енергії дозволяє розв'язати задачу визначення та підтримання оптимальної потужності умовно-керованих відновлюваних джерел в залежності від поставленої мети на етапі проектування та на етапі експлуатації з урахуванням показників якості електроенергії. Недотримання останніх віддає отриманий розв'язок від оптимального.

3. Розроблено метод визначення узагальненого показника ефективності функціонування електричної мережі за критерієм мінімуму втрат активної потужності. Показано, що використання узагальнених показників ефективності функціонування електричної мережі дозволяє отримати якісні схемні рішення щодо приєднання ВДЕ до електромереж. Враховуючи взаємозв'язок між окремими критеріями оптимальності приєднання ВДЕ до електромереж, розроблені схеми, крім зменшення втрат електроенергії, забезпечують також вирівнювання профілю напруги в ЕМ.

4. Використовуючи метод невизначених множників Лагранжа, отримано аналітичні умови оптимальності схем транспортування електроенергії ВДЕ в локальних електричних системах за критерієм мінімуму втрат. На їх основі розроблено закон та алгоритм оперативного керування засобами зміни конфігурації схем приєднання відновлюваних джерел енергії.

5. Розроблено спосіб узгодження графіків генерування відновлюваних джерел енергії та споживання локальних електричних систем, що передбачає реконфігурацію схеми видачі електроенергії та підвищує ефективність експлуатації електричних мереж без погіршення прибутковості енергогенеруючих компаній.

6. Розроблено алгоритми визначення оптимальної встановленої потужності для заданого місця приєднання ВДЕ в ЛЕС та визначення оптимального місця приєднання ВДЕ заданої потужності за критерієм мінімуму втрат. Вказані алгоритми можуть бути ефективно використані для зниження втрат електроенергії в розподільних мережах, а у поєднанні з локальним регулятором забезпечують можливість автоматизації даного процесу.

7. Працездатність та ефективність запропонованих у роботі методів і алгоритмів підтверджена обчислювальними експериментами з оптимізації та керування режимами відновлюваного джерела, що працює спільно з СЕС. Розроблені програми передано для дослідно-промислової експлуатації на підприємство ПАТ «Вінницяобленерго», що здійснює експлуатацією розподільних електричних мереж з ВДЕ. Їх впровадження дозволило досягти зменшення втрат в окремих ЕМ на 5–10%, а також забезпечити нормативні відхилення напруги.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Матеріали дисертаційної роботи викладено в таких опублікованих наукових працях:

1. Кулик В.В. Оптимальне керування розосередженими джерелами електроенергії з асинхронними генераторами засобами *Smart Grid* [Електронний ресурс] / В.В. Кулик, Т.Є. Магас, Ю.В. Малогулко // Наукові

праці ВНТУ. Енергетика та електротехніка. – 2011. – №4. – С. 1-6. Режим доступу: <http://praci.vntu.edu.ua/article/view/1404/999>. – ISSN 2307-5376.

2. Бурикін О.Б. Оптимізація режиму локальних електричних систем з відновлюваними джерелами енергії [Текст] / О.Б. Бурикін, Ю.В. Малогулко // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія «Електротехніка та електротехнології». – 2013. – №2. – Вип. 15 (338). – С. 42-46. – ISSN 2074-2630.

3. Кулик В.В. Оптимізація перетікань активної та реактивної потужностей у розподільних електромережах засобами розосередженого генерування [Текст] / В.В. Кулик, О.Б. Бурикін, Ю.В. Малогулко // Вісник Вінницького політехнічного університету. Енергетика та електротехніка. – 2014. – №1. – С. 90-93. – ISSN: 1997-9274.

4. Рубаненко О.Є. Вдосконалення математичного забезпечення комп'ютерних систем оптимізації режимів локальних електричних систем з відновлюваними джерелами енергії [Текст] / О.Є. Рубаненко, О.Б. Бурикін, Ю.В. Малогулко // Науковий вісник Чернівецького університету. Серія «Комп'ютерні системи та компоненти». – 2014. – №2 (5). – С. 85-93. – ISSN 2311-9276.

5. Лежнюк П.Д. Оптимізація функціонування розосереджених джерел енергії в локальних електричних системах. енергії [Текст] / П.Д. Лежнюк, О.Є. Рубаненко, Ю.В. Малогулко // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – 2014. – №60 (1102). – С. 68-77. – ISSN 2079-4525.

6. Кулик В.В. Дослідження ефективності сумісної експлуатації локальних електричних мереж з ВДЕ та систем централізованого електропостачання [Текст] / В.В. Кулик, О.Б. Бурикін, Ю.В. Малогулко // Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». Серія «Гірництво». Електрифікація та автоматизація гірничих робіт». – 2014. – Вип. 25. – С. 113-120. – ISSN 2079-5688.

7. Бурикін О.Б. Стандартизація функціонування локальних енергосистем при їх інтеграції у системи централізованого живлення на базі концепції *Smart Grid* [Текст] / О.Б. Бурикін, Ю.В. Томашевський, Ю.В. Малогулко // Енергетика и электрификация. – 2012. – № 12. – С. 46-48. – ISSN 0424-9879.

8. Кулик В.В. Оптимальне керування відновлюваними джерелами електроенергії на підставі *Smart Grid* / В.В. Кулик, О.Б. Бурикін, Ю.В. Малогулко // Відновлювана енергетика XXI століття: XII міжнарод. наук.-техн. конф.: матеріали конференції. – АР Крим: Інститут відновлюваної енергетики НАН України, 2011.

9. Бурикін О.Б. Перспективи інтеграції розподілених джерел енергії у локальні енергосистеми на базі концепції *Smart Grid* / О.Б. Бурикін, Ю.В. Малогулко // «Підвищення рівня ефективності енергоспоживання в електротехнічних пристроях і системах». IV міжнарод. наук.-техн. конф.: матеріали конференції. – Луцьк : РВВ ЛНТУ, 2012. – С. 37 – 40.

10. Бурикін О.Б. Спосіб узгодження графіків генерування сонячних електростанцій та споживачів енергії локальних електричних систем /

О.Б. Бурикін, Ю.В. Малогулко, О.В. Нікіторович // Відновлювана енергетика XXI століття: XV міжнарод. наук.-техн. конф.: матеріали конференції. – Київ: Інститут відновлювальної енергетики НАН України, 2014. – С. 52-55.

11. Малогулко Ю.В. Ефективність сумісної експлуатації локальних електричних мереж з відновлюваними джерелами енергії / Ю.В. Малогулко // «Підвищення рівня ефективності енергоспоживання в електротехнічних пристроях і системах». V міжнарод. наук.-техн. конф.: матеріали конференції. – Луцьк: РВВ ЛНТУ, 2014. – С. 146-149.

АНОТАЦІЯ

Малогулко Ю. В. Оптимізація функціонування відновлюваних джерел енергії в локальних електричних системах. – 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, 2015.

Дисертаційна робота присвячена підвищенню ефективності функціонування відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) шляхом оптимізації транспортних можливостей локальних електричних систем (ЛЕС). В роботі показано, що вдосконалення існуючих методів і засобів визначення оптимального місця приєднання ВДЕ підвищить надійність функціонування локальної електричної системи та покращить показники якості електроенергії. Використання узагальнених показників ефективності проектних рішень щодо схеми видачі електроенергії ВДЕ дозволить отримати оптимальні схеми приєднання ВДЕ до електромереж для сукупності характерних режимів. Розроблений метод дозволяє оцінити чутливість сумарних втрат потужності в ЛЕС, як критерію оптимальності її режимів, та втрат потужності в окремих вітках електричних мереж до зміни генерування у вузлах з ВДЕ. Застосування запропонованого способу узгодження графіків генерування умовно-керованих ВДЕ з місцевим електроспоживанням дозволяє підвищити надійність функціонування ЛЕС, покращити показники якості електроенергії та дає можливість оперативного керування режимами роботи джерелами розосередженого генерування без погіршення їх прибутковості.

Ключові слова: відновлювані джерела енергії, локальна електрична система, оптимальне місце приєднання, реконфігурація схеми, оптимальне керування.

Малогулко Ю. В. Оптимизация функционирования возобновляемых источников энергии в локальных электрических системах. - На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.14.02 – электрические станции, сети и системы. – Винницкий национальный технический университет, Винница, 2015.

Диссертация посвящена повышению эффективности функционирования возобновляемых источников энергии путем оптимизации транспортных

возможностей локальных электрических систем. В работе показано, что совершенствование существующих методов и средств определения оптимального места присоединения возобновляемых источников энергии повысит надежность функционирования локальной электрической системы и улучшит показатели качества электроэнергии. Использование обобщенных показателей эффективности проектных решений касательно схемы выдачи электроэнергии возобновляемых источников позволит получить эффективные схемы их присоединения к электрическим сетям. Разработанный метод позволяет оценить чувствительность суммарных потерь мощности в локальных электрических системах, как критерия оптимальности их режимов, и потерь мощности в отдельных ветвях электрических сетей, к изменению генерирования в узлах с возобновляемыми источниками энергии. Применение предлагаемого способа согласования графиков генерации условно – управляемых возобновляемых источников энергии с местным электропотреблением позволяет повысить надежность функционирования локальной электрической системы, улучшить показатели качества электроэнергии и дает возможность оперативного управления режимами работы источниками рассредоточенного генерирования без ухудшения их прибыльности.

Ключевые слова: возобновляемые источники энергии, локальная электрическая система, оптимальное место присоединения, реконфигурация схемы, оптимальное управление.

Malogulko J.V. Optimization of the functioning of the renewable energy sources in the local electrical systems. – Manuscript.

Thesis for the degree of candidate of technical sciences, specialty 05.14.02 – electric stations, networks and systems. – Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, 2015.

Recently, in the world there is proof interest to the problems of using renewable energy sources (RES). The reasons for that are many factors. First of all, it is because renewables in electric power systems (EPS) is the very reserve, which under certain conditions can provide significant energy savings. Energy saving is achieved by the use of renewables of primary energy and decentralized power generation and, consequently, reducing the cost of its transportation and distribution.

The fact that the design and operation of renewables in the present conditions and their impact on modes of power grids (PG) is not investigated properly, inconsistency of the specified key equipment to the needs of these sources, the lack of common decisions on protection and automation of electric power cannot make sound design decisions during their development also does not allow to use them effectively. So, the development of methodological, informational and technical support of their operation is a question of urgent importance. A comprehensive and methodological unity in decision-making to improve the performance of renewable energy in electrical systems is also very important in this regard. In engineering practice a variety of optimization problems solved a number of electrical distribution

networks with renewable energy. They can be divided into those that can be resolved during the design and operation.

The government support for development of renewable energy stimulates research on the design and operation of RES in order to improve energy security of our country and reduce the impact of energy on the environment. Today such sources operating directly in the LES, which leads to a gradual transition from centralized power supply to the combined, when the part of the electricity produced by RES.

That is why, optimization problem of the actual operation of RES in the LES can be solved by using the complex criteria. It is can solved as a problem of design by using the criteria of determine the optimal installed capacity, and like an operation problem by using the criteria of optimize daily regime generation and renewable electricity schemes issuance of LES with RES. This can allow to increase the profitability of power supply and power generating companies by improving performance electrical equipment of LES. It was paid the attention to the formation of smart grids, to the research of principles of the LES with RES in the concept of Smart Grid. Also it were analyzed the world experience and the comparative analysis of intellectual functioning standards of LES and their integrating into the system of centralized power supply. The experience in solving problems of optimization of RES in the distribution networks, the features of RES and methods for optimizing their functioning in the LES were explored and systematized.

The analysis of solving some optimization problems of distribution power networks with renewable energy sources around the world is done in the thesis. Systematization of considered problems and investigation of their possible application in order to optimize the LES is fulfilled. It is determined that as an optimization criteria of LES it is reasonable to use the maximum profit got from renewable electricity, taking into account their impact on the work of PG. The survey showed that the solution proposed to optimize the problem of perspective for the development of renewable energy sources will determine the optimal location and the optimal installed capacity of renewable energy in LES under the terms of their joint operation. A purpose-oriented optimization function of local power systems mode with renewable energy in terms of reducing energy losses, improving its quality in LES and improving the reliability of power supply is suggested in the thesis.

It was shown that advisable to use the criteria of optimization the modes of LES criterion of maximum profit from producing electrical energy by RES, with the considering their impact in electrical network. The developed method for determining the generalized index the efficiency of the functioning the electrical network with the criteria of minimum of active power losses shows that use of indicators can allow the effective connection schemes of RES to power network. The proposed analytical conditions of optimal transportation schemes in LES with criteria of minimum power losses uses for the development the laws and algorithms of operational management connection schemes of RES.

Also was developed the method of coordination of schedules of generation RES and consumption LES. It can anticipate the reconfiguration of scheme power delivery and can increase the operational efficiency of electrical networks without the

deterioration of profitability energy companies. It were developed the algorithms of determining the optimal installed capacity for a given place of RES in LES, the algorithm for determining the optimal placement RES by using the criteria of minimum power losses. These algorithms can be used for the reduction power losses in distribution networks. The efficiency and effectiveness of the methods and algorithms were confirmed by the computational experiments.

The new solution of actual scientific and applied problem of renewable energy sources optimization in the local electrical systems received in the thesis for determine the optimal installed capacity of renewables, for selecting optimal schemes of their accession and for automation of optimal control of their work as part of the electrical system. It can reduce the transportation of electricity losses and improve its quality.

Keywords: renewable energy sources, local electrical system, optimal connection placement, reconfiguration scheme, optimal control.

Підписано до друку 02.10.2015 р. Формат 29,7×42 ¼

Наклад 100 прим. Зам. №2015-094.

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.