

ФУНКЦІЇ СУЧАСНИХ СИСТЕМ ЕНЕРГОМЕНЕДЖМЕНТУ МІКРОМЕРЕЖІ В УМОВАХ ПІДКЛЮЧЕННЯ ДО СИСТЕМИ РОЗПОДІЛУ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ЗГІДНО ІЗ ВИМОГАМИ МІЖНАРОДНИХ СТАНДАРТІВ

І.В. Блінов*, докт. техн. наук, **С.О. Палачов****, канд. техн. наук, **Є.В. Парус*****, канд. техн. наук, **О.Г. Клименко******

Інститут електродинаміки НАН України,

пр. Берестейський, 56, Київ, 03057, Україна

e-mail: blinovihor@gmail.com, palp@ukr.net, paruseugene@gmail.com

Публікацію присвячено дослідженню структури та функцій системи енергоменеджменту мікромережі згідно з діючими міжнародними стандартами, зокрема для реалізації завдань зниження витрат на електричну енергію для користувачів мікромережі. Виконано огляд термінології для систем управління режимами мікромереж. Досліджено особливості ієрархічного структурування цілей та завдань управління роботою мікромережі за різних ступенів впливу обмежень в обсягах отримуваної від системи розподілу електричної енергії. Досліджено особливості розв'язання задач планування режимів роботи мікромережі за різних критеріїв оптимізації, визначено складові процедур оптимізації режимів мікромережі. Показано структуру функцій системи управління енергією для керування енергетичним устаткуванням мікромережі, підключеної до системи розподілу. Бібл. 14, рис. 3.

Ключові слова: мікромережа, енергоменеджмент, система управління, планування режимів.

Вступ. Сучасні світові та українські енергетичні системи перебувають на переломному етапі свого розвитку. Зростаючі екологічні виклики, необхідність декарбонізації, а також потреба в підвищенні надійності та стійкості енергопостачання в умовах старіння інфраструктури та відмови від централізованої моделі виробництва стимулюють перехід до нових, більш гнучких та інтелектуальних рішень. У цьому контексті концепція «розумних мереж» (Smart Grids) та її реалізація у вигляді локальних енергетичних систем, відомих як мікромережі (Microgrids), набуває особливої актуальності [1]. Розумні мережі забезпечують двосторонній обмін даними та електроенергією, дозволяючи оптимізувати процеси генерації, передачі та споживання, тоді як мікромережі, інтегруючи розподілені джерела генерації, системи накопичення енергії та адаптивне навантаження, здатні функціонувати як автономно, так і в складі об'єднаної енергетичної системи (ОЕС) України.

Для України, яка активно рухається шляхом інтеграції до європейських енергетичних ринків, розвиток мікромереж є стратегічно важливим завданням [2]. Особливої актуальності це набуло в умовах руйнування значної частини енергетичної інфраструктури та великих об'єктів генерації внаслідок воєнних дій, що підкреслює критичну потребу у розвитку децентралізованої генерації та децентралізації управління режимами енергосистем. Розвиток сучасних технологій децентралізованої генерації та інтелектуального управління локальними енергетичними об'єктами не тільки сприяє підвищенню енергетичної безпеки, а й відповідає вимогам міжнародних стандартів [3], що регламентують ефективність, надійність та якість енергопостачання. Впровадження мікромереж сприяє раціональному використанню відновлюваних джерел енергії, мінімізації втрат та підвищенню якості електроенергії на локальному рівні. Однак ефективна робота цих складних систем неможлива без застосування сучасних підходів до їхнього управління.

Складність планування та оперативного управління мікромережею в умовах стохастичної нерегульованої генерації від відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) та динамічної зміни навантаження вимагає створення інтелектуальних систем управління. Ці системи мають забезпечувати не тільки стабілізацію режимів роботи, але й оптимізацію економічних показників та максимізацію використання доступних ресурсів. Ключовим елементом такої системи є

енергетичний менеджмент, який відповідає за збір даних, аналіз, прогнозування та прийняття рішень щодо раціонального використання наявних енергетичних ресурсів.

Таким чином, постає нагальна необхідність у дослідженні та структуруванні функцій системи планування режимів мікромережі. Виходячи з вимог міжнародних стандартів, це дослідження має зосередитися на формуванні структури та визначенні ключових функцій системи енергетичного менеджменту як основи загальної системи управління режимами роботи енергетичного устаткування мікромережі, необхідних для розв'язання задач планування режимів мікромережі.

Мета публікації полягає у дослідженні структури та функцій системи енергетичного менеджменту для управління та планування режимів роботи енергетичного устаткування мікромережі, підключеної до системи розподілу в ОЕС України.

Визначення та цілі систем енергетичного менеджменту. Розглянемо особливості у визначеннях і характеристиках сучасних технологій децентралізованого управління в електроенергетиці згідно з чинними міжнародними стандартами. Під *розумною мережею* (Smart Grid) розуміється інтелектуальна інфраструктура, яка підтримує двосторонній обмін інформацією і енергією між джерелами, споживачами, системами зберігання та мережею для оптимального балансування, надійності і ефективності. На відміну від традиційних електроенергетичних систем з централізованою системою управління потоками енергії від виробника до споживача, *розумна мережа* забезпечує двосторонній потік енергії та інформації між постачальниками та споживачами. Це дозволяє ефективніше керувати мережею, підвищувати її надійність, інтегрувати ВДЕ та дає споживачам можливість контролювати власне споживання. У [4] під *розумними мережами* розуміються «електричні мережі, що використовують технології керування електроенергетичними системами та інформаційного обміну, пов'язаного із ним, відповідні елементи технічних систем, призначені для зчитування, керування процесами, зокрема даними, та комутаційне обладнання для об'єднання в економічно ефективний спосіб поведінки та дій всіх приєднаних до неї споживачів, учасників ринку електричної енергії з метою забезпечення економічної ефективної, надійної, безпечної, сталої роботи енергетичної системи з низькими втратами і високим рівнем якості та безпеки постачання». Натомість терміном *мікромережа* в [5] означена група взаємозв'язаних навантажень і розподіленої генерації із визначеними електричними межами, що утворюють локальну електроенергетичну систему на рівні системи розподілу електричної енергії, яка діє як єдиний керований об'єкт і здатна працювати паралельно з ОЕС України (паралельний режим мікромережі) або в острівному режимі мікромережі.

В українському законодавстві термін *система енергетичного менеджменту* (СЕМ) має більш широке значення, ніж те, що, зазвичай, використовують в контексті концепції *розумних мереж*. Згідно з [4] СЕМ запроваджують та забезпечують її функціонування органи державної влади, підприємств, установ та організацій, що належать до сфери їх управління, і вона визначається як «система управління, що визначає енергетичну політику та цілі, енергетичні завдання, плани дій та процеси для досягнення цілей та енергетичних завдань». Разом із цим в [4] визначено поняття «*енергетичний менеджмент мікромережі*» – система забезпечення функціонування та керування навантаженнями і розподіленою генерацією мікромережі. При цьому вимоги до таких систем не визначено в національній законодавчій базі, регламентуючій документації, наприклад, кодексах систем розподілу або системи передачі, що обумовлює актуальність формування таких вимог для користувачів мікромереж в Україні.

Згідно з [6–9] СЕМ в мікромережі є верхньою частиною трирівневої ієрархічної структури управління, яка складається з рівня захисту та динамічного керування (первинний контроль), управління енергією, рівня системи моніторингу та керування (вторинний контроль), а також рівня планування роботи СЕМ (третинний контроль). Зазначені рівні розрізняються згідно з функціями, що вони виконують у мікромережі, а також часом реакції системи відповідного рівня.

Рівень захисту та контролю перехідних процесів характеризується часом реакції від мілісекунд до секунд. Функції рівня захисту та первинного контролю вихідних параметрів (струм, напруга) реалізують безпосередньо в об'єктах ВДЕ, як правило, в автоматичному та

автономному режимі з метою забезпечення максимальної швидкодії без очікування команд від вищих щаблів управління. Опис вимог до архітектури та функцій рівня захисту та контролю перехідних процесів наведений у [8].

Рівень системи моніторингу та контролю режимів виділяється в окремий щабель управління із реалізацією відповідної системи для *мікромереж* із встановленою потужністю більше 100 кВт. Для *мікромереж* із меншою встановленою потужністю, зазвичай функції моніторингу та контролю інтегруються разом із функціями управління енергією у відповідному контролері (системі управління) мікромережі. Вторинний контроль в основному призначений для компенсації відхилень напруги та частоти на рівні системи, спричинених первинним контролем. За допомогою роботи цієї системи можна забезпечити необхідну стабільність напруги та частоти. Опис вимог до архітектури та функцій рівня системи моніторингу і контролю режимів наведений, наприклад, у [8]. Для невеликих мікромереж, в яких функції рівнів управління енергією та моніторингу і контролю реалізує мікроконтролер, архітектура та функції визначені у [10].

Згідно з [11] СЕМ виконує такі функції в мікромережі:

Прогнозування виробництва електроенергії. СЕМ здійснює прогнозування обсягів генерації електроенергії на основі попередньої ретроспективної інформації, наприклад, даних вимірювань тощо. Для мікромереж, що містять вітрові та фотоелектричні станції, СЕМ мікромережі повинна бути оснащена функціями моніторингу ресурсів та налаштована для отримання можливості прогнозування потужності ВДЕ.

Управління розподіленими енергетичними ресурсами:

1) СЕМ відповідає за управління виробництвом електроенергії за допомогою розподілених енергетичних ресурсів, зокрема систем накопичення енергії, включаючи управління постачанням палива для виробництва електроенергії, управління станом виробництва електроенергії та поточним обслуговуванням відповідних об'єктів, управління станом накопичення енергії та управління пріоритетами використання джерел енергії.

2) для мікромережі з кількома джерелами електроенергії СЕМ може встановити одне з них як основне джерело, а для інших джерел встановити послідовність виведення з резерву.

Управління навантаженням:

1) СЕМ має здійснювати класифікацію навантаження в мікромережі та керування ним відповідно до вимог користувача щодо надійності електропостачання та з урахуванням таких факторів, як вплив переривання електропостачання на безпеку персоналу, забезпечення надійної роботи мікромережі, а також ступінь економічного впливу або фінансових втрат. Відповідно до визначеної класифікації навантаження СЕМ мікромережі має бути здатна заздалегідь визначити стратегії перемикавання навантаження та плани дій для мікромережі на випадок будь-яких умов, що можуть мати місце.

2) В автономному режимі СЕМ мікромережі має бути здатна реалізовувати стратегію зниження потужності для кожного типу навантаження, застосовуючи визначені цикли та періоди керування, параметри живлення тощо.

Планування обсягів генерації електроенергії:

1) Планування графіків виробництва електроенергії, заряджання та розряджання накопичувачів енергії для кожного розподіленого енергетичного ресурсу. Це здійснюється шляхом оптимізаційного розрахунку оптимальних режимів роботи мікромережі на основі заздалегідь розроблених графіків, даних щодо прогнозування виробництва електроенергії та навантаження, даних про поточний стан мікромережі в режимі реального часу, характеристик електропостачання та навантаження, експлуатаційних обмежень та плану навантаження.

2) Управління ресурсами мікромережі у відповідності з добовим графіком виробництва електроенергії та погодинним графіком споживання електроенергії. План виробництва та споживання електроенергії має містити графік вихідної потужності на 24 години наступної доби, роздільна здатність якого не повинна перевищувати 15 хвилин. Обсяг генерації має бути запланованим з поточного часу до наступних 4 годин зі зсувом початкової точки відліку кожні 15 хв.

Керування напругою та реактивною потужністю. СЕМ мікромережі повинна налаштовувати оптимальний режим керування реактивною потужністю для регулювання напруги, наприклад, забезпечення фіксованого коефіцієнта потужності або обсягу реактивної потужності, застосування функціональної залежності напруга/реактивна потужність, забезпечення автономного балансу потужності тощо, а також надавати значення або діапазон налаштувань параметрів для вибраного режиму керування реактивною потужністю. Також СЕМ мікромережі повинна мати функцію встановлення порядку послідовності застосування обладнання для компенсації реактивної потужності.

Статистичний аналіз та оцінка:

1) Функції статистичного аналізу та оцінки системи СЕМ мікромережі повинні включати аналіз ресурсів, аналіз обміну енергією, аналіз генерації та споживання енергії, а також аналіз економічної вигоди, надійності та якості електроенергії.

2) Для мікромережі, яка використовує енергію вітру або фотоелектричну енергію як основне джерело енергії, система управління енергією мікромережі повинна виконувати аналіз можливостей генерації на основі даних моніторингу ресурсів вітру та сонця.

3) СЕМ мікромережі має виконувати статистичний аналіз виробництва електроенергії внутрішніми джерелами, обсягів використання електроенергії із зовнішньої системи розподілу, а також від систем накопичення енергії, а також обсяги обміну електричною енергією між мікромережею та системою розподілу.

4) СЕМ повинна мати функцію аналізу надійності електропостачання мікромережі, яка враховує аналіз рівня безперервності електропостачання, кількість та тривалість відключення електроенергії за рік тощо, а також функцію аналізу якості електроенергії в точці підключення до зовнішньої мережі.

Планування та розроблення мікромереж та систем керування ними. Комплексну функціональну специфікацію мікромережі та її системи керування можна розробити, тільки з урахуванням основних цілей та задач створення мікромережі, які визначають сценарій використання мікромереж та, базуються на економічних чинниках та визначенні переваг для зацікавлених сторін. Ціллю планування мікромережі є визначення можливості реалізації цих переваг або вирішення проблем, які очікуються.

На основі визначених цілей створюється конфігурація системи: Для цього треба визначити базову схему конфігурації розподіленої генерації мікромережі, що здатна забезпечити необхідні умови споживання електроенергії, на основі аналізу навантаження та ресурсів та стратегії роботи системи. Наступним етапом є проектування електричної системи, під час якого визначають рівень напруги системи, точку спільного підключення до зовнішньої мережі, структуру електричної мережі, розрахунок потоку потужності, аналіз безпеки та стабільності.

Одним із підходів до систематичної розробки сценарію використання та визначення цілей мікромережі та її системи керування є підхід на основі варіантів використання. Це системна процедура, яка має визначити наступне:

1) Зацікавлені сторони — до них належать: клієнти та кінцеві користувачі мікромережі, споживачі та навантаження розподільчої мережі, незалежні виробники електроенергії у мікромережі та оператор системи розподілу. До речі, суспільство також може бути бенефіціаром від створення мікромережі.

2) Переваги створення мікромережі зазвичай пов'язані з постачанням безпечної та надійної енергії, а також підтримкою якості електроенергії в мікромережі та допоміжні послуги, що можуть бути надані зовнішній системі розподілу. Очікувані переваги у свою чергу визначають цілі системи керування мікромережею, а вони відповідно визначають необхідний перелік з наведених вище функцій СЕМ для кожної конкретної мікромережі.

Переваги мікромережі можна загалом класифікувати наступним чином:

a) підвищення надійності та забезпечення енергопостачання для всіх або частини своїх навантажень шляхом підтримки ізольованого режиму роботи;

b) забезпечення віддалених районів електроенергією з нижчою вартістю (у порівнянні із будівництвом мереж централізованого електропостачання);

с) зниження витрат на електроенергію для користувачів мікромереж у режимі підключення до мережі шляхом оптимізації таких активів, як: накопичення енергії, регульоване навантаження та генератори, інтеграція навантажень мікромережі та джерел енергії (генераторів) в єдиній взаємодіючій структурі надання допоміжних послуг мережі (виробництво реактивної потужності та регулювання напруги, забезпечення резервного живлення, можливість запуску власної генерації в ізолюваному режимі, а також забезпечення резерву для регулювання частоти);

д) забезпечення готовності до стихійних лих шляхом оптимізації таких активів, як: накопичувачі енергії, регульоване навантаження та генератори.

е) покращення енергоефективності, зменшення викидів за рахунок використання сонячної та вітрової енергії.

Мета та потреби використання мікромережі окреслені в [9] як основні сценарії застосування мікромережі.

Проведений у [12] аналіз засвідчив актуальність для електроенергетики України сценарію *с*, тобто оптимізації використання наявних локальних енергоресурсів (таких, як джерела відновлюваної енергії та установки зберігання енергії) з метою зменшення витрат на закупівлю електричної енергії у постачальника. Відповідно оптимізація графіків функціонування локальних енергетичних ресурсів для зменшення вартості закупівлі електричної енергії є однією із основних цілей в задачах планування режимів роботи мікромережі. При цьому, як зазначено у [9], характерні для інших сценаріїв завдання також повинні враховуватися у сценарії *с* як додаткові цілі, актуальність яких збільшується чи зменшується за різних зовнішніх чинників.

У наступних розділах публікації зосереджено увагу на функціях рівня управління передусім в частині розв'язання задач планування режимів мікромережі. Відповідно аналіз завдань для системи управління режимами мікромережі здійснено з огляду на виконання процедур підготовки до реалізації режимів функціонування енергетичного устаткування в мікромережі.

Завдання системи управління режимами мікромережі в умовах обмежень електропостачання. Розглянемо особливості ієрархічного структурування завдань управління роботою мікромережі під впливом обмежень в обсягах отримуваної від системи розподілу електроенергії. Обмеження споживачів характерні в умовах масштабних руйнувань об'єктів генерації та інфраструктури передачі і розподілу електроенергії в ОЕС України внаслідок воєнних дій і продовжуватимуться деякий час по завершенню війни. На рис. 1 обмеження в електропостачанні споживачів сортовані за обсягами і часом від відсутності будь-яких обмежень на обсяги електроспоживання до відсутності електропостачання споживачів довгі періоди часу. Розглянемо детальніше особливості структурування завдань управління режимами мікромережі за різних ступенів впливу обмежень в електропостачанні.

Можливість роботи в ізолюваному режимі зазначена в [10, 4] як базова властивість безпосередньо у визначенні терміну *мікромережа*. Відповідно до невід'ємних складових системи управління мікромережі відносяться функції контролю режимів і балансування електроенергії в умовах відсутності під'єднання до зовнішньої системи розподілу. До функцій контролю режимів відносяться задачі контролю рівнів напруг у вузлах локальної мережі та моніторинг струмів в елементах електричних з'єднань. Основними засобами балансування електроенергії в ізолюваному режимі мікромережі є установки зберігання енергії, регульовані джерела електроенергії та регульоване навантаження в мікромережі.

Підтримку ізолюваного режиму мікромережі слід розглядати як важливу функцію для реалізації завдань контролю та моніторингу в частині оперативного технологічного управління режимом мікромережі за відсутності електричного зв'язку із системою централізованого електропостачання. При цьому основна мета виконання функцій управління в ізолюваному режимі функціонування мікромережі полягає у забезпеченні електричною енергією навантаження мікромережі чи критичної його частини на заданий період часу. Навантаження мікромережі поділяються на різні типи залежно від рівня їхньої критичності та керованості:

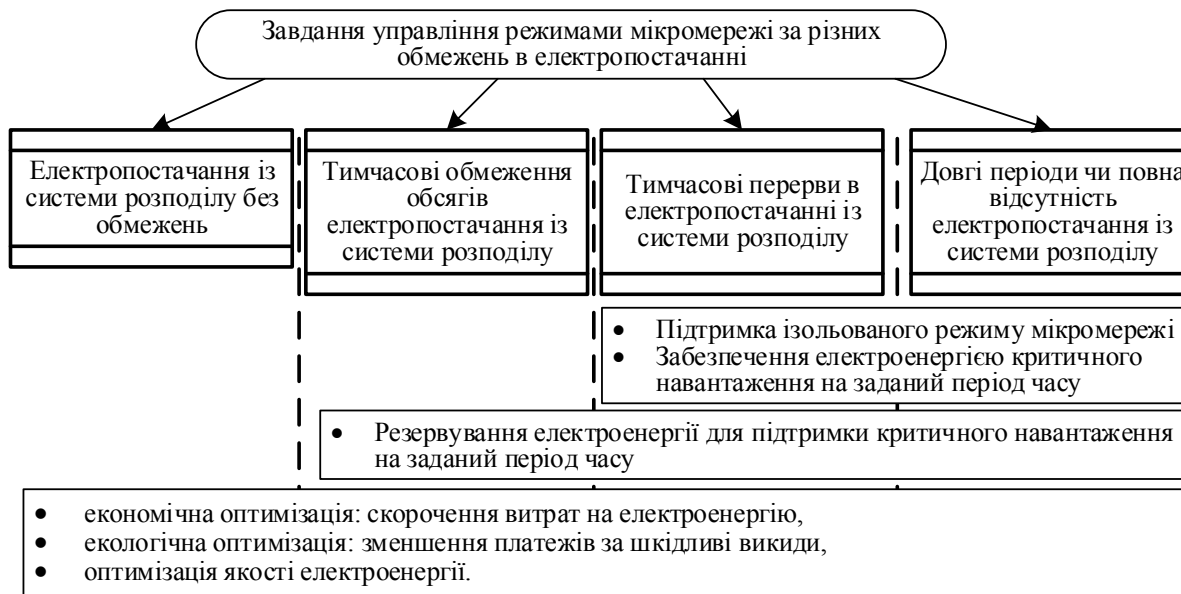


Рис. 1. Структура та цілі завдань управління режимами мікромережі за різних обмежень в електропостачанні

а) критичні навантаження, робота яких має бути забезпечена у всіх нормальних режимах роботи мікромережі. Зазвичай їх не можна обмежувати у постачанні енергії. Прикладами є пристрої, що належать до інформаційних технологій та живлення комп'ютерів, систем керування будівлями, системами безпеки та системами забезпечення життєдіяльності (наприклад, освітлення евакуації).

б) пріоритетні навантаження – це навантаження, які можна обмежувати за необхідності, але їх живлення бажано підтримувати, якщо це можливо.

с) керовані навантаження – це навантаження, живлення яких можна періодично переривати або встановлювати на різних рівнях енергоспоживання. Прикладами є живлення систем опалення, вентиляції та кондиціонування повітря (охолоджувачі, кондиціонери) та несуттєве промислове технологічне обладнання. Наприклад, будівля з надлишковою потужністю фотоелектричних генеруючих потужностей вранці може охолодити будівлю до нижчої, ніж зазвичай температури, а потім використовувати це для компенсації нагріву будівлі від денного тепла.

д) навантаження, які можна будь-коли відключити або перервати у часи, коли попит перевищує можливості генерації. Прикладами є накопичення теплової енергії, перекачування води, де є достатня кількість резервуарного сховища, та заряджання акумуляторів у системах розподіленого накопичування енергії.

е) навантаження для відведення та скидання енергії – ці навантаження використовуються, коли є надлишкові генеруючі потужності, а скорочення виробництва електроенергії неможливе, або коли є економічна вигода від використання надлишкової відведеної енергії. Прикладом є відвідне навантаження для вітрової турбіни, яка поглинає енергію раптових поривів вітру.

Для реалізації задачі забезпечення пріоритетного живлення навантаження у відповідності до їхніх типів критичності слід передбачити резерв енергоресурсів, розрахований на одну із технологічних задач:

– живлення прогнозованого рівня критичного навантаження мікромережі протягом прогнозованого періоду живлення від системи розподілу;

– забезпечення прогнозованих обсягів електроспоживання критично важливих технологічних процесів на період реалізації цих процесів за відсутності живлення від системи розподілу.

Завдання забезпечення електроенергією критичного навантаження на заданий період часу вирішується на етапі планування режимів роботи мікромережі шляхом розв'язання наступних задач:

1) визначення обсягів енергетичних ресурсів, необхідних для реалізації завдання забезпечення електроенергією критичного навантаження на період реалізації критично важливих технологічних процесів та/або на період відсутності живлення від системи розподілу;

2) планування графіків роботи енергетичного устаткування мікромережі з метою гарантування наявності необхідних резервів енергії на очікуваний момент зникнення живлення від системи розподілу чи на очікуваний момент початку виконання критично важливих технологічних процесів.

Аналогічно розв'язуються задачі планування та реалізації функцій управління режимами мікромережі в умовах обмежень обсягів отримуваної із системи розподілу електроенергії. Так само визначається обсяг енергетичних ресурсів, необхідних для компенсації обмежень у постачанні електроенергії із системи розподілу, та виконується планування графіків накопичення енергоресурсів для забезпечення стану готовності до реалізації таких режимів. Відповідно функції оперативного технологічного управління мікромережею стосуються виділення накопичених енергетичних ресурсів для дотримання обмежень в обсягах отримуваної із системи розподілу електроенергії.

Загалом у процедурах планування функцій управління режимами мікромережі враховуються наступні технічні і режимні обмеження:

- обмеження відпуску електроенергії (максимальна та мінімальна потужність генерації, максимальні потужності заряджання/розряджання УЗЕ, мінімальний «час простою», «час запуску» і «час зупинки» устаткування, максимальна швидкість змінення потужності енергетичного устаткування, мінімальний час на перемикання між режимами пуск/зупинка енергетичного устаткування або заряд/розряд УЗЕ);

- обмеження режимів функціонування локальної електроенергетичної системи (баланси генерація/навантаження, контроль потоків електроенергії, заданий мінімум резервів генерації, екологічні обмеження, наприклад – обсяги шкідливих викидів, обсяги обміну у точці приєднання локальної електроенергетичної системи до системи розподілу, малі обмеження стабільності сигналу, обмеження якості електроенергії, обмеження потужності ліній електропередач і кабельних ліній);

- обмеження надійності електропостачання (ймовірність ненавантаженого стану мікромережі, стохастичні обмеження потужності ВДЕ, обмеження випадкових витрат);

- стохастичні обмеження наявних енергетичних ресурсів;

- обмеження ринкової поведінки;

- обмеження, які гарантують безпечну роботу мікромережі.

- обмеження роботи в режимі реального часу (імітація непередбачуваних подій).

Завдання оптимізації витрат на отримання електричної енергії ставиться згідно із економічними, екологічними чи іншими критеріями. Оптимізація витрат за обраними критеріями є основним завданням за відсутності обмежень в обсягах отримуваної із системи розподілу електроенергії. За наявності обмежень в електропостачанні оптимізація витрат розглядається як додаткова ціль раціонального використання наявних енергоресурсів. У такій задачі оптимізації обмеження обсягів у різні періоди часу відіграють роль режимних обмежень. Методи та підходи до вирішення завдання оптимізації витрат зумовлюються обраною первинною ціллю.

Вирішення завдання оптимізації режимів функціонування мікромережі.

Розглянемо детальніше особливості вирішення завдань із технічними, економічними та екологічними цілями оптимізації (рис. 2).

Технічні цілі оптимізації полягають у підвищенні якості електроенергії і набувають особливої актуальності для споживачів з електроустаткуванням, чутливим до якості електроенергії. Потреба у заходах підвищення якості виникає у віддалених приєднаннях до системи розподілу, де складно утримувати характеристики режиму електричної мережі у нормованих

межах. Крім того, погіршення якості електроенергії, отримуваної споживачами, спостерігається в обтяжених і післяаварійних режимах електричних мереж, коли оператор мережі першочергово вирішує проблему утримування режиму енергосистеми від перебоїв у роботі навіть ціною погіршення якості електроенергії для споживачів.

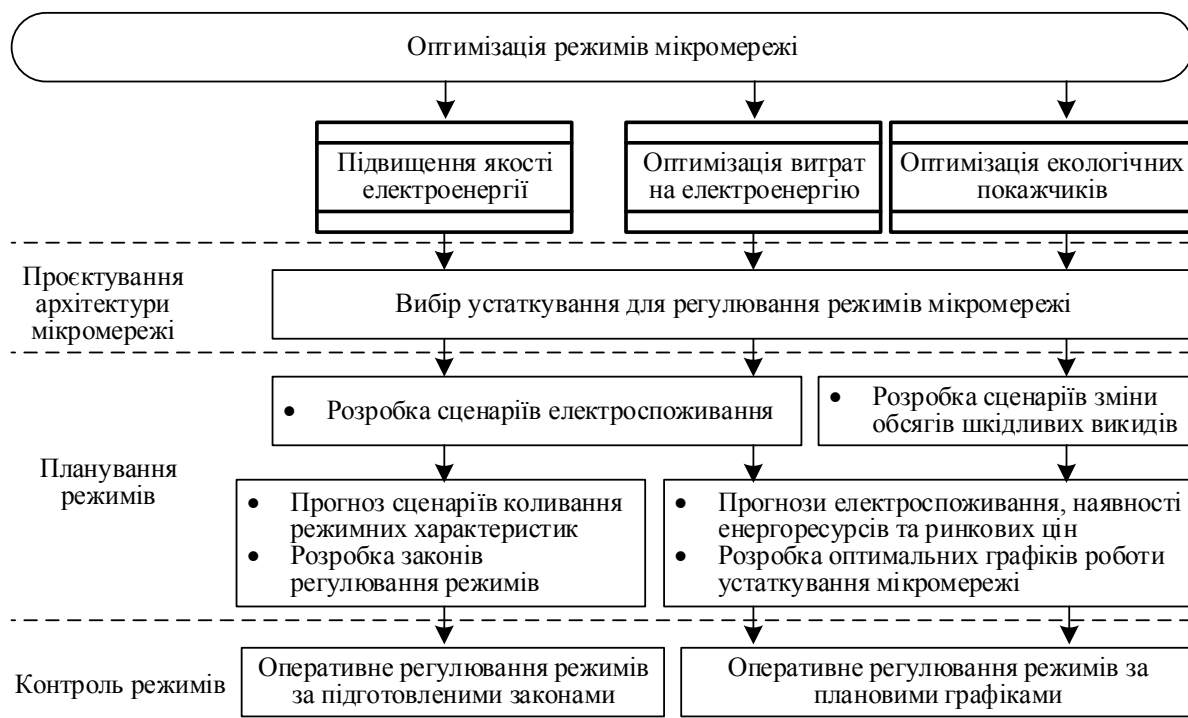


Рис. 2. Складові процедур оптимізації режимів мікромережі

Вирішення проблеми низької якості електроенергії розпочинається вже на етапі проектування архітектури мікромережі і полягає у виборі засобів, здатних підвищувати якість електроенергії до прийнятного рівня. Для вже діючої мікромережі здійснюється ряд заходів планування з метою підготовки до допустимих режимів зі зниженою якістю електроенергії:

– за можливості здійснюється дослідження і розробка різних сценаріїв функціонування мікромережі з такими змінами у структурі електроспоживання, які дозволяють зменшити мінімально необхідний обсяг енергетичних ресурсів для підтримки належної якості електроенергії; завдання стосується заходів комплексного планування всіх складових діяльності локальної електроенергетичної системи з метою зниження негативного впливу низької якості електроенергії, мікромережа у цьому разі розглядається як комплексна система управління енергетичними процесами з метою підвищення якості електроенергії до якомога вищого рівня;

– здійснюється прогноз і розробка сценаріїв електропостачання із отриманням від системи розподілу електроенергії зниженої якості; розроблені сценарії визначають проміжки часу, в яких необхідно вживати заходів з підвищення якості електроенергії та оцінку обсягів енергетичних ресурсів, необхідних для приведення якості електроенергії до прийнятного рівня;

– здійснюється розробка законів регулювання електричних режимів мікромережі; закони регулювання визначають набір команд управління енергетичним устаткуванням мікромережі як реакцію на змінення значень контрольованих характеристик електричних режимів в мікромережі; закони регулювання формуються як для централізованої системи моніторингу і контролю режимів мікромережі, так і для децентралізованого управління режимами окремого енергетичного устаткування на основі оперативної інформації від засобів моніторингу електричних режимів мікромережі.

Розроблені закони регулювання використовуються у процедурах оперативного управління технологічними процесами в локальній електроенергетичній системі. Частина законів регулювання визначає правила управління окремим енергетичним устаткуванням і формує

децентралізовану систему контролю і управління режимами мікромережі, наприклад – функції змінення потужності регульованої генерації чи потужності відпуску електроенергії від установки зберігання енергії як реакція на змінення рівня напруги у контрольованому вузлі локальної електроенергетичної системи. Частина законів регулювання використовується централізованою системою управління, передусім – активація/деактивація окремих функцій управління, перемикання режимів роботи та зміна законів регулювання для окремого енергетичного устаткування та інші команди комплексного контролю режимів мікромережі.

Оптимізація режимів за економічними критеріями надає найбільш адекватні показники ефективності роботи окремого енергетичного устаткування зокрема і мікромережі загалом. Імітація режимів локальної електроенергетичної системи з економічними критеріями оптимізації на етапі проєктування архітектури та функцій мікромережі надає економічне обґрунтування для вибору енергетичного устаткування мікромережі.

Для вже діючої мікромережі в задачах планування економічні критерії оптимізації режимів дозволяють отримати ефективні графіки експлуатації енергетичного устаткування. У загальному випадку основним економічним критерієм оптимізації є максимізація вигоди від процедур купівлі/продажу електричної енергії. Якщо для мікромережі не передбачається продаж надлишків електроенергії, ціль оптимізації може бути зведена до мінімізації суми витрат на закупівлю електроенергії. Заходи щодо планування режимів устаткування з метою підвищення ефективності роботи локальної електроенергетичної системи за заданими економічними критеріями:

- за потреби, здійснюється дослідження і розробка різних сценаріїв реалізації технологічних процесів у споживачів електроенергії, які у подальшому дозволять обрати економічно найбільш ефективний сукупний графік електроспоживання в мікромережі;
- здійснюється прогноз і розробка графіків відпуску електроенергії з нерегульованих джерел генерації та прогноз ринкових цін;
- виконується оптимізація режимів роботи енергетичного устаткування мікромережі за обраними економічними критеріями, за результатами якої формуються планові графіки режимів роботи регульованих електроенергетичних установок в мікромережі.
- для установок з децентралізованим управлінням в мікромережі здійснюється розробка законів регулювання із пропорційно-інтегральними характеристиками чи з набором команд «ввімкнути/вимкнути» за мітками часу.

Розроблені планові графіки та закони регулювання використовуються у процесах оперативного управління технологічними процесами в локальній електроенергетичній системі. Окрім реалізації планових режимів, закони регулювання потужності енергетичного устаткування виконують завдання балансування потоків електроенергії в умовах відхилення фактичних обсягів нерегульованої генерації та електроспоживання від прогнозованих значень. Складові для формування таких законів регулювання формуються на етапі планування оптимальних режимів мікромережі. Основним критерієм оптимальності законів регулювання є мінімізація вартості небалансів (різниці між обсягами купленої та фактично спожитої електроенергії) для мікромережі.

Екологічна складова у загальному випадку може бути врахована в задачах оптимізації за економічними критеріями. Так для різних сценаріїв реалізації технологічних процесів у споживачів електроенергії додатково розраховуються об'єми шкідливих викидів. Граничні норми шкідливих викидів враховуються відповідними обмеженнями у математичних моделях оптимізації. Цільова функція в задачі оптимізації за економічними критеріями доповнюється змінною, яка враховує суму штрафів за шкідливі викиди в залежності від об'єму таких викидів в різних режимах роботи локальної електроенергетичної системи.

Структура і функції рівня планування управління енергією у СЕМ в складі мікромережі. Розглянемо особливості реалізації процедур розв'язання задач рівня управління енергією, викладених в [6]. Загалом для розв'язання задач управління енергією використовуються функції ведення ретроспективної інформації, функції планування режимів та функції підготовки до реалізації запланованих режимів (рис. 3).

До функцій ведення ретроспективної інформації віднесені передусім задачі накопичення оперативних даних системи моніторингу режимів мікромережі. Для вирішення завдань планування режимів мікромережі виконується попередній аналіз накопиченої ретроспективної інформації. Для приватних домогосподарств та дрібного бізнесу завдання ведення ретроспективної інформації вирішується засобами локальної системи управління базами даних на персональному комп'ютері. Для організацій і промислових підприємств система управління базами даних виділяється на окремий сервер даних. Для великих і територіально розподілених підприємств та організацій додатково використовуються віддалені сервери даних, зокрема хмарні сховища.



Рис. 3. Основні функції рівня планування управління енергією в СЕМ мікромережі

Завдання планування режимів роботи енергетичного устаткування мікромережі вирішуються шляхом розв'язання задач, наведених у попередньому розділі публікації. Розглянемо ці задачі з огляду на типи програмних засобів, призначених для їх розв'язання. При розв'язанні задач планування режимів роботи енергетичного устаткування мікромережі виконуються три основні типи завдань: генерація сценаріїв розвитку режимів функціонування мікромережі та системи розподілу, прогнози електроспоживання та нерегульованої генерації в мікромережі, прогноз ринкових цін, задачі оптимізації для раціонального використання наявних енергетичних ресурсів в мікромережі.

Сценарії розвитку режимів функціонування мікромережі, зокрема сценарії реалізації технологічних процесів, призначені для оцінки надійності електропостачання в локальній електроенергетичній системі та для формування законів регулювання режимів енергетичного устаткування мікромережі у позаштатних ситуаціях. Крім того, сценаріями розвитку режимів функціонування мікромережі імітуються різні варіанти послідовності і обсягів електроспоживання при виконанні технологічних процесів на виробництві. Для непромислових об'єктів виконується розробка сценаріїв ведення господарської діяльності. Сценарії розвитку режимів функціонування системи розподілу призначені для імітації обмежень в обсягах електроспоживання та перебоїв в електропостачанні. Розробка сценаріїв здійснюється на основі аналізу ретроспективної інформації із врахуванням очікуваних перспектив реалізації технологічних процесів та ймовірних обмежень в електропостачанні від системи розподілу.

Прогнози в задачах планування режимів мікромережі включають: прогнозування виробництва електроенергії, прогнозування навантаження та прогнозування цін на електроенергію. Для розв'язання задач прогнозування використовується накопичена ретроспективна інформація, а також ряд внутрішніх і зовнішніх чинників. До внутрішніх чинників відносяться: сценарії реалізації технологічних процесів чи господарської діяльності, а також поточні технічні стани енергетичного устаткування мікромережі. До зовнішніх чинників відносяться: кліматичні умови (прогноз погоди з урахуванням сезону року), очікувані обмеження в елект-

ропостачанні із системи розподілу, а також очікувана кон'юнктура на ринку електроенергії. За потреби, прогнозовані графіки генерації, електроспоживання і ринкових цін формуються окремо для кожного сценарію режимів функціонування мікромережі. Задачі прогнозування розв'язуються, як правило, з використанням методів і алгоритмів штучного інтелекту, наприклад – нейронних мереж [13].

Оптимізація режимів енергетичного устаткування мікромережі виконується з метою раціонального використання наявних енергетичних ресурсів за обраними критеріями оптимальності із дотриманням заданих технічних і режимних обмежень [14]. Вибір методів і засобів оптимізації зумовлюється переважно рівнями деталізації технічних характеристик енергетичного устаткування мікромережі, а також особливостей технологічних процесів чи видів господарської діяльності. Відповідно до обраних рівнів деталізації формуються математичні моделі узгоджено із методами оптимізації. Залежно від особливостей сформованої математичної моделі розрізняють розповсюджені задачі оптимізації, такі як: лінійне/нелінійне програмування, цілочислове та змішане цілочислове лінійне програмування, динамічне програмування, багатоцільове програмування і т.і. Для оптимізації режимів складних локальних електроенергетичних комплексів також застосовуються евристичні алгоритми чи засоби штучного інтелекту з метою швидкого розрахунку прийнятних режимів функціонування мікромережі в умовах неповноти вхідної інформації, комбінаторної складності математичної моделі чи проблем побудови формалізованого опису процесів у локальній електроенергетичній системі.

До основних цілей оптимізації відносяться мінімізація витрат на закупівлю електроенергії та максимізація вигоди від продажу надлишків згенерованої електроенергії. Для промислових підприємств і комерційних організацій цільова функція додатково враховує очікувану вигоду від реалізації продукції чи надання послуг. За потреби цільова функція додатково враховує платежі за шкідливі викиди у навколишнє середовище. Характеристики енергетичного устаткування мікромережі та очікувані обмеження обсягів електропостачання від системи розподілу подаються системою обмежень у математичних моделях. Позаштатні ситуації в мікромережі та у системі розподілу доцільно виділяти в окремі сценарії функціонування мікромережі. За результатами оптимізації отримуються планові графіки режимів регульованого енергетичного устаткування мікромережі та графіки обсягів купівлі/продажу електроенергетичної енергії.

Останній етап вирішення завдання планування режиму функціонування мікромережі полягає у підготовці до реалізації планових графіків. Здійснюються транзакції купівлі/продажу електроенергії на торгових платформах ринку електроенергії чи замовлення таких графіків у електропостачальника. Формалізуються закони регулювання енергетичного устаткування мікромережі для відповідності плановим графікам. Оновлені закони регулювання використовуються у процедурах перепрограмування контролерів чи сервера управління режимами мікромережі.

Висновки. Таким чином за результатами досліджень визначено основні функції системи енергетичного менеджменту для управління та планування режимів роботи енергетичного устаткування мікромережі, роль, структуру і функцій системи планування управління енергією у трирівневій ієрархічній структурі управління мікромережею. Показано, що комплексну функціональну специфікацію мікромережі можна розробити, визначивши основні цілі системи керування мікромережі. Цілі розробки і роботи мікромережі визначають сценарій її використання, базуються на економічних чинниках та визначенні інших переваг для зацікавлених сторін. Очікувані переваги у свою чергу визначають цілі системи керування мікромережею, а цілі мікромережі визначають необхідний перелік з наведених у публікації функцій СЕМ.

Реалізація вказаної структури і функції рівня планування управління енергією у складі СЕМ мікромережі дозволить ефективно вирішувати завдання зниження витрат для користувачів мікромережі в умовах обмеження обсягів постачання електроенергії із системи розподілу ОЕС України. Отримані результати є основою для подальших досліджень зі створення моделей функціонування мікромереж та систем енергетичного менеджменту мікромереж.

1. Кириленко О.В., Денисюк С.П., Блінов І.В. Цифрова трансформація: сучасні тенденції та завдання. *Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України*. 2023. Вип. 65. С. 5–14. DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2023.65.005>
2. Концепція впровадження “розумних мереж” в Україні до 2035 року. Розпорядження Кабінету Міністрів України 14.10.2022 № 908-р.
URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/908-2022-%D1%80#Text> (дата звернення 1.08.2025).
3. Кириленко О.В., Блінов І.В., Зайцев С.О., Палачов С.О., Васильченко В.І. Впровадження міжнародних та європейських стандартів для розвитку ОЕС України згідно з концепцією Smart Grid. *Праці Інституту електродинаміки НАН України*. 2022. Вип. 63. С. 5–12. DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2022.63.005>
4. Про енергетичну ефективність: Закон України від 01.01.2025 р. № 1818-IX.
URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1818-20#Text> (дата звернення 08.08.2025).
5. Про ринок електричної енергії: Закон України від 13.04.2017 р. № 2019-VIII.
URL: <https://zakon3.rada.gov.ua/laws/show/2019-19> (дата звернення 1.08.2025)
6. IEC TS 62898 3 2:2024 Microgrids – Part 3 2: Technical requirements – Energy management systems. – International Electrotechnical Commission, 2024, 94 p.
7. IEC TS 62898-3-4:2023 Microgrids – Part 3-4: Technical requirements – Microgrid monitoring and control systems. Geneva: IEC, 2023, 70 p.
8. IEC TS 62898-3-1:2020+Amd.1:2023 Microgrids – Part 3-1: Technical requirements – Protection and dynamic control. Geneva: IEC, 2023, 144 p.
9. IEC TS 62898-1:2017/Amd.1:2023 Microgrids – Part 1: Guidelines for microgrid projects planning and specification. Geneva: IEC, 2023, 72 p.
10. IEEE 2030.7-2017 IEEE Standard for the Specification of Microgrid Controllers. – Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2017, 78 p.
11. IEEE Std 2030.9™-2019 IEEE Recommended Practice for the Planning and Design of the Microgrid, 2019, 45 p.
12. Блінов, І.В., С.О. Палачов, Є.В. Парус, О.Г. Клименко. Сценарії використання мікромереж згідно з міжнародними стандартами. *Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України*. Київ, 2025. Вип. 70. С. 14–25. DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2025.70.014>
13. Mirosnyk, V., Shymaniuk, P., Sychova, V., Loskutov, S. Short-Term Load Forecasting in Electrical Networks and Systems with Artificial Neural Networks and Taking into Account Additional Factors. In: Kyrylenko, O., Denysiuk, S., Derevianko, D., Blinov, I., Zaitsev, I., Zaporozhets, A. (eds) *Power Systems Research and Operation. Studies in Systems, Decision and Control*, Springer, Cham. 2023. Vol. 220. Pp 87–105. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-17554-1_5
14. Блінов, І., Парус, Є., Шиманюк, П., Ворушило, А. Модель оптимізації функціонування мікромережі з СЕС та установкою зберігання енергії. *Технічна електродинаміка*. 2024. № 5, С. 69–78. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2024.05.069>

FUNCTIONS OF UP-TO-DATE MICROGRID ENERGY MANAGEMENT SYSTEMS UNDER GRID-CONNECTED OPERATION IN COMPLIANCE WITH INTERNATIONAL STANDARDS

I. Blinov, S. Palachov, Ye. Parus, O. Klymenko

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,
Beresteyskyi ave., 56, Kyiv, 03057, Ukraine

This publication is devoted to the study of the structure and functions of microgrid energy management systems in accordance with current international standards, particularly in the context of reducing electricity costs for microgrid users. A review of terminology related to microgrid operation control systems is provided. The hierarchical structuring of goals and control tasks for microgrid operation is analyzed under varying degrees of constraints on electricity supply from the distribution grid. The paper investigates approaches to microgrid operation planning based on different optimization criteria and identifies the key components of optimization procedures. The structure of energy management system functions for controlling the energy equipment of a microgrid connected to the distribution system is defined. Ref. 14, fig. 3.

Keywords: microgrid, energy management, control system, mode planning.

1. Kyrylenko O., Denysiuk S., Blinov I. Digital transformation of the energy industry: current trends and task. *Pratsi Instytutu Elektrodynamiky NAN Ukrainy*. 2022. V. 65. Pp. 5–14. (Ukr)
DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2022.65.005>
2. Concept of implementation of “smart grids” in Ukraine by 2035. Order of the Cabinet of Ministers of Ukraine 14.10.2022 № 908-p.
URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/908-2022-%D1%80#Text> (Accessed at 1.08.2025) (Ukr)

3. Kyrylenko O., Blinov I., Zaitsev Ie., Palachov S., Vasylychenko V. International and European standards implementation for uses of Smart Grid concept in IPS of Ukraine. *Pratsi Instytutu Elektrodynamiky NAN Ukrainy*. 2022. V. 63. Pp. 5–12. (Ukr) DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2022.63.005>
4. On energy efficiency: Law of Ukraine of 01.01.2025. № 1818-IX.
URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1818-20#Text> (Accessed at 8.08.2025) (Ukr)
5. On Electricity Market: The Law of Ukraine 13.04.2017. No 2019-VIII.
URL: <https://zakon3.rada.gov.ua/laws/show/2019-19> (Accessed at 01.08.2025) (Ukr)
6. IEC TS 62898 3 2:2024 Microgrids. Part 3 2: Technical requirements. Energy management systems. International Electrotechnical Commission, 2024, 94 p.
7. IEC TS 62898-3-4:2023 Microgrids. Part 3-4: Technical requirements. Microgrid monitoring and control systems. Geneva: IEC, 2023. 70 p.
8. IEC TS 62898-3-1:2020+Amd.1:2023 Microgrids. Part 3-1: Technical requirements. Protection and dynamic control. Geneva: IEC, 2023, 144 p.
9. IEC TS 62898-1:2017/Amd.1:2023 Microgrids. Part 1: Guidelines for microgrid projects planning and specification. Geneva: IEC, 2023, 72 p.
10. IEEE 2030.7-2017 IEEE Standard for the Specification of Microgrid Controllers. Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2017, 78 p.
11. IEEE Std 2030.9™-2019 IEEE Recommended Practice for the Planning and Design of the Microgrid, 2019, 45 p.
12. Blinov I.V., Palachov S.O., Parus Ye.V., Klymenko O.H. Use cases of microgrids according to international standards. *Pratsi Instytutu Elektrodynamiky NAN Ukrainy*. V. 2025. No 70, Pp. 14–25. (Ukr) DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2025.70.014>
13. Miroshnyk, V., Shymaniuk, P., Sychova, V., Loskutov, S. Short-Term Load Forecasting in Electrical Networks and Systems with Artificial Neural Networks and Taking into Account Additional Factors. In: Kyrylenko, O., Denysiuk, S., Derevianko, D., Blinov, I., Zaitsev, I., Zaporozhets, A. (eds) *Power Systems Research and Operation. Studies in Systems, Decision and Control*, Springer, Cham. 2023. Vol. 220. Pp 87–105.
DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-17554-1_5
14. Blinov I.V., Parus Ye.V., Shymaniuk, P.V., Vorushylo A.O. Optimization model of microgrid functioning with solar power plant and energy storage system. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2024. No 5. Pp. 69–78. (Ukr)
DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2024.05.069>

Надійшла: 19.08.2025

Прийнята: 26.08.2025

Submitted: 19.08.2025

Accepted: 26.08.2025