

ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА РИНКИ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

УДК 621.311:681.3

DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2025.70.014>

СЦЕНАРІЇ ВИКОРИСТАННЯ МІКРОМЕРЕЖ ЗГІДНО З МІЖНАРОДНИМИ СТАНДАРТАМИ

І.В. Блінов *, д-р. техн. наук, проф., **С.О. Палачов****, канд. техн. наук, **Є.В. Парус*****, канд. техн. наук, **О.Г. Клименко******, асп.

Інститут електродинаміки НАН України,

пр. Берестейський, 56, Київ, 03057, Україна

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

Публікація присвячена дослідженню основ впровадження та цілей використання мікромереж у системах розподілу. Розглянуто основні процеси зміни нормативно-правової бази української електроенергетики в частині стимулювання децентралізації генерації та управління режимами енергосистем. Уточнено перелік задач, які необхідно розв'язати на етапі переходу від визначення загальних принципів створення мікромереж до конкретизації деталей їх практичного використання в Україні. Виконано огляд основних міжнародних стандартів, які стосуються побудови та експлуатації мікромереж. Розглянуто визначені стандартами основні сценарії використання мікромереж як локальних енергетичних систем. Для кожного сценарію виділено передумови та цілі його застосування, а також основні функції мікромережі, якими реалізується зазначений сценарій. Визначено найбільш актуальні для української електроенергетики способи побудови та сценарії використання мікромереж. Бібл. 19, рис. 2.

Ключові слова: мікромережі, сценарії використання, локальна енергетична система, розподілені енергоресурси, відновлювані джерела, установка зберігання енергії.

Вступ. Сьогодні в Україні активно реалізуються процеси впровадження в сферу електроенергетики нових технологій, які істотно впливають, в першу чергу, на розподільні електричні мережі, переводячи їх на новий якісний рівень розвитку і функціонування [1]. Разом із цим в умовах аварійних ситуацій у системах передачі і розподілу, а також за критичних дисбалансів виробництва і споживання електроенергії вимушено переривається електропостачання груп споживачів, зокрема і об'єктів критичної інфраструктури. Тому доцільним є застосування комбінованого підходу до забезпечення електропостачання споживачів, який передбачає у разі необхідності виділяти частину мережі в ізолюваний (острівний) режим навколо розподіленої генерації, з автоматичним підтриманням основних параметрів мережі.

Сучасні технології функціонування енергосистем надають можливості вирішення проблеми надійності та безперервності електропостачання не тільки за рахунок додаткового резервування у централізованих системах розподілу, але і шляхом диверсифікації джерел електричної енергії із залученням локальних об'єктів генерації та зберігання. Важливим атрибутом диверсифікації джерел електроенергії за допомогою локальних систем електропостачання є здатність локальної системи функціонувати як паралельно з зовнішньою системою розподілу з живленням від ОЕС України, так і в автономному режимі з живленням від власних джерел енергії. Для реалізації таких можливостей необхідно визначити принципи формування та узгодження спільної роботи систем розподілу електроенергії як за умов нормальних режимів ОЕС України, так і при виникненні надзвичайних ситуацій в системах централізованого електропостачання зі значними обмеженнями чи повному припиненні електропостачання.



У цих умовах використання технології мікромереж відіграє роль локального центру керування місцевою системою електропостачання як в умовах підключення до енергосистеми у складі ОЕС України, і в режимах ізольованого від ОЕС України функціонування. Тому мікромережі є важливою складовою подальшої інтеграції технологій відновлюваної енергетики, підвищення ефективності і надійності електропостачання, а також електричних мереж у напрямку децентралізації управління режимами ОЕС України.

На виконання планів розвитку децентралізованих систем управління в електроенергетиці України у жовтні 2022 року Урядом схвалено Концепцію впровадження «розумних мереж» в Україні до 2035 року та затверджено деталізований план заходів з її реалізації. До складових розвитку «розумних мереж», разом із іншими визначеними у Концепції важливими заходами, віднесені і мікромережі. У 2024 році в закон України «Про ринок електричної енергії» були внесені доповнення, якими встановлені визначення мікромережі як: «групи 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» [2]. Крім того протягом 2023 та 2024 років до Кодексу систем розподілу України [3] була внесена низка суттєвих доповнень, що стосуються практичної організації у структурі системи розподілу електроенергії локальних систем електропостачання, здатних видавати енергію від власних джерел енергії до зовнішніх розподільних мереж (режим активного споживача), а також працювати у режимі енергетичного острова при виникненні надзвичайних ситуацій в ОЕС України.

На виконання [4] в Україні реалізуються процеси впровадження нових технологій в електроенергетиці, зокрема «розумних мереж». Ці інновації сприяють переходу на новий рівень розвитку енергетики, який характеризується заходами в напрямку декарбонізації процесу виробництва енергії та створення високоефективної структури генеруючих потужностей із значною часткою відновлюваних джерел енергії (ВДЕ).

Таким чином в Україні вже почався перехід від визначення загальних принципів створення локальних систем електропостачання до конкретизації деталей їх практичного використання. Зокрема виникає потреба у вирішенні наступних основних завдань:

- аналіз актуальних задач в електроенергетиці України, а також можливих цілей, що можуть бути досягнуті шляхом впровадження мікромереж. Це передбачає вивчення міжнародного досвіду створення та експлуатації мікромереж, а також визначення доцільності застосування цього досвіду в Україні;
- аналіз сфер застосування різних сценаріїв функціонування мікромереж в Україні;
- розвиток теоретичних моделей застосування мікромереж, які мають бути адаптовані до чинних норм, Правил улаштування електроустановок та Кодексу систем розподілу;
- оцінка шляхів підвищення ефективності роботи мікромереж як у режимі паралельної роботи з енергосистемою, так і в острівному режимі;
- дослідження системних та мережевих обмежень в мікромережах для їх урахування при вирішенні задач оптимізації режимів роботи в них.

Мета статті полягає у дослідженні структури та сценаріїв функціонування мікромереж для визначення найбільш актуальних в Україні сфер застосування мікромереж. Дослідження виконані з використанням чинних українських та міжнародних стандартів, які стосуються принципів побудови та функціонування мікромереж. Результати дослідження призначені для визначення ролі мікромереж у сучасній структурі ринку електричної енергії України, а також для створення комплексної основи проектування і впровадження мікромереж в українські системи електропостачання, беручи до уваги технічні, економічні та регуляторні аспекти.

Сфера застосування мікромереж та їхнє місце в ОЕС України.

За визначеннями, наведеними у серії стандартів IEC TS 62898, мікромережею є група взаємопов'язаних навантажень та розподілених енергетичних ресурсів з визначеними електричними межами, що утворюють локальну електроенергетичну систему на розподільних рівнях напруги, що діє як єдиний керований об'єкт та здатний працювати в острівному

режимі. Таким чином, у структурі ОЕС України мікромережа розглядається як підключений до системи розподілу локальний електроенергетичний об'єкт. На відміну від «традиційної» групи споживачів електричної енергії, які живляться від системи розподілу, мікромережа розглядається як об'єкт з функціями комплексного управління режимами електроспоживання за наявності власних (локальних) джерел генерації і зберігання електроенергії. До функцій управління мікромережею відносять, передусім, функцію живлення принаймні частини споживачів електроенергії за відсутності електричного зв'язку із системою розподілу (так званий «острівний» режим). За підключення мікромережі до системи розподілу функції управління надають можливості оптимізації режимів електроспоживання за економічними, екологічними чи іншими критеріями за рахунок використання власних ресурсів генерації і зберігання електроенергії. Функції мікромережі відповідають концепції децентралізації виробництва електроенергії та систем управління режимами ОЕС України. Проте мікромережа як об'єкт з комплексним адаптивним управлінням режимами споживання/генерації електроенергії ускладнює функції управління режимами у системі розподілу. Тому актуальності набуває задача більш чіткого визначення структури і функцій мікромереж з метою визначення можливостей використання локальних енергетичних ресурсів як для оптимізації електропостачання споживачів, так і для узгодження з режимами функціонування систем розподілу електроенергії.

Огляд національних та міжнародних стандартів, що стосуються мікромереж.

Висока вартість енергоносіїв зумовила великий інтерес в країнах Євросоюзу до відновлювальних джерел енергії малої потужності, доступних побутовим споживачам, а державна система субсидування забезпечила відносно малий термін їх окупності, і як наслідок – масове застосування цих установок. Цей процес не був залишений без уваги Міжнародною електротехнічною комісією (МЕК, англ. IEC). Досвід приєднань мікромереж до систем електропостачання та подальшої їхньої експлуатації узагальнено та викладено у виданнях міжнародних стандартів, технічних звітів і технічних специфікацій.

Публікації МЕК мають форму рекомендацій для міжнародного використання, однак вони також можуть бути прийняті як міжнародні європейські стандарти (за умови їх схвалення CENELEC) та як національні стандарти України (в цьому випадку рішення приймають технічні комітети стандартизації та національний орган стандартизації). Оскільки національні та міжнародні стандарти не знаходяться у вільному доступі, у списку посилань на літературу наводяться URL-посилання на офіційні WEB-сторінки каталогу з описом стандарту та функцією замовлення екземпляру стандарту.

На сьогодні технічний комітет ТК 162 забезпечує впровадження в Україні низки найбільш важливих стандартів МЕК, що стосуються «розумних мереж» [5], зокрема мікромереж, а саме:

- ДСТУ IEC TR 63097:2024 Дорожня карта зі стандартизації розумних мереж (IEC TR 63097:2017, IDT) - вже діє [6];
- ДСТУ IEC TS 62898 Microgrids (Мікромережі), багаточастинний стандарт – вже діють усі частини;
- ДСТУ IEC SRD 62913 «Generic Smart Grid Requirements» (Загальні вимоги до розумної мережі) – заплановано до прийняття.

Багаточастинний стандарт IEC TS 62898 є базовим стандартом, що визначає основні принципи проектування, побудови та функціонування мікромереж. Він складається із семи частин:

1. IEC TS 62898-1: 2017+AMD 1: 2023 Microgrids – Part 1: Guidelines for microgrid projects planning and specification (Мікромережі – Частина 1: Рекомендації щодо планування та специфікації проектів мікромереж) [7];
2. IEC TS 62898-2: 2018+AMD 1: 2023 Microgrids - Part 2: Guidelines for operation (Мікромережі – Частина 2: Інструкції з експлуатації) [8];
3. IEC TS 62898-3-1: 2020 + AMD 1: 2023 Microgrids - Part 3-1: Technical requirements - Protection and dynamic control (Мікромережі. Частина 3-1. Технічні вимоги. Захист і динамічний контроль) [9];

4. IEC TS 62898-3-2:2024 Microgrids - Part 3-2: Technical requirements - Energy management systems (Мікромережі. Частина 3-2. Технічні вимоги. Системи енергоменеджменту) [10];

5. IEC TS 62898-3-3: 2023 Microgrids - Part 3-3: Technical requirements - Self-regulation of dispatchable loads (Мікромережі. Частина 3-3. Технічні вимоги. Саморегулювання диспетчеризованих навантажень) [11];

6. IEC TS 62898-3-4: 2023 Microgrids - Part 3-4: Technical requirements - Microgrid monitoring and control systems (Мікромережі. Частина 3-4. Технічні вимоги. Системи моніторингу та керування мікромережами) [12];

7. IEC TS 62898-4: 2023 Microgrids - Part 4: Use cases (Мікромережі. - Частина 4: Варіанти використання) [13].

Розглянемо основні положення стандартів у частинах структури та основних сценаріїв експлуатації мікромереж. У [7] визначена класифікація мікромереж як ізолюваних та неізолюваних. Ізолювана мікромережа у [7] визначається як: «група взаємопов'язаних навантажень і розподілених енергетичних ресурсів з визначеними електричними межами, що утворюють локальну електроенергетичну систему на рівнях розподільної напруги, які не можуть бути підключені до більш широкої системи розподілу електроенергії». Під неізолюваною у [7] розуміється мікромережа, яку можливо підключити до більш широкої мережі електропостачання. Неізолювані мікромережі можуть виступати в якості керованих вузлів електроенергетичної системи і працювати в двох режимах:

- режим паралельної роботи з зовнішньою мережею електропостачання;
- острівний режим з живленням від власних джерел енергії.

Крім того, у [7] наведено типові однолінійні схеми ізолюваних та неізолюваних мікромереж. Наприклад, на рис. 1 наведено схему неізолюваної мікромережі, яка містить джерела розосередженої генерації, що використовують енергію різних типів, а також систему накопичення енергії. Зазначений тип мікромережі може працювати як у режимі паралельної роботи із системою розподілу загального призначення, так і ізолювано в режимі організованого енергетичного острову.

Також у [7] наведено стислий огляд можливих типових сценаріїв використання мікромережі в комерційній діяльності. Докладний опис сценаріїв комерційної експлуатації мікромереж наведений у [13].

На рис. 2 схематично відображено шість основних сценаріїв використання (business use cases, скорочення BUC) мікромереж, запропонованих у серії у стандартів [7 – 13]:

Сценарій А – гарантування безперервності у роботі навантаження за рахунок можливості функціонування мікромережі в острівний режим;

BUC В - електропостачання у віддалені райони за допомогою відновлюваних джерел енергії;

BUC С - оптимізація використання локальних ресурсів для підвищення надійності та ефективності електропостачання споживачів мікромережі (покращення їх сервісного обслуговування);

BUC D - оптимізація локальних ресурсів для забезпечення готовності енергосистеми до стихійних лих;

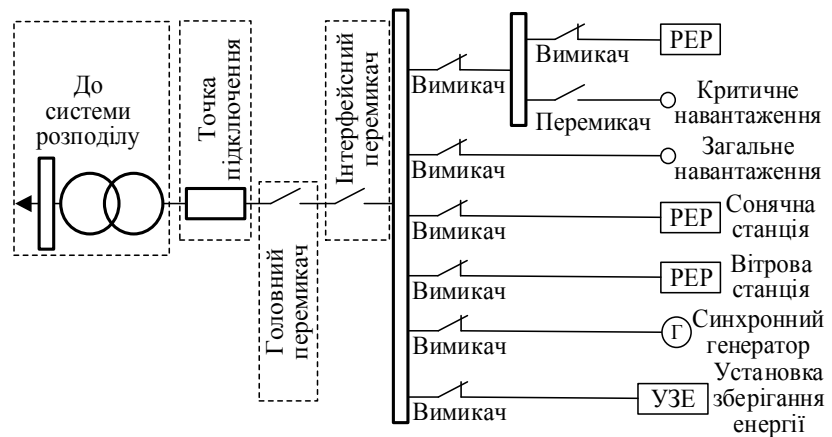


Рис. 1. Топологія типової неізолюваної мікромережі (IEC TS 62898-1)

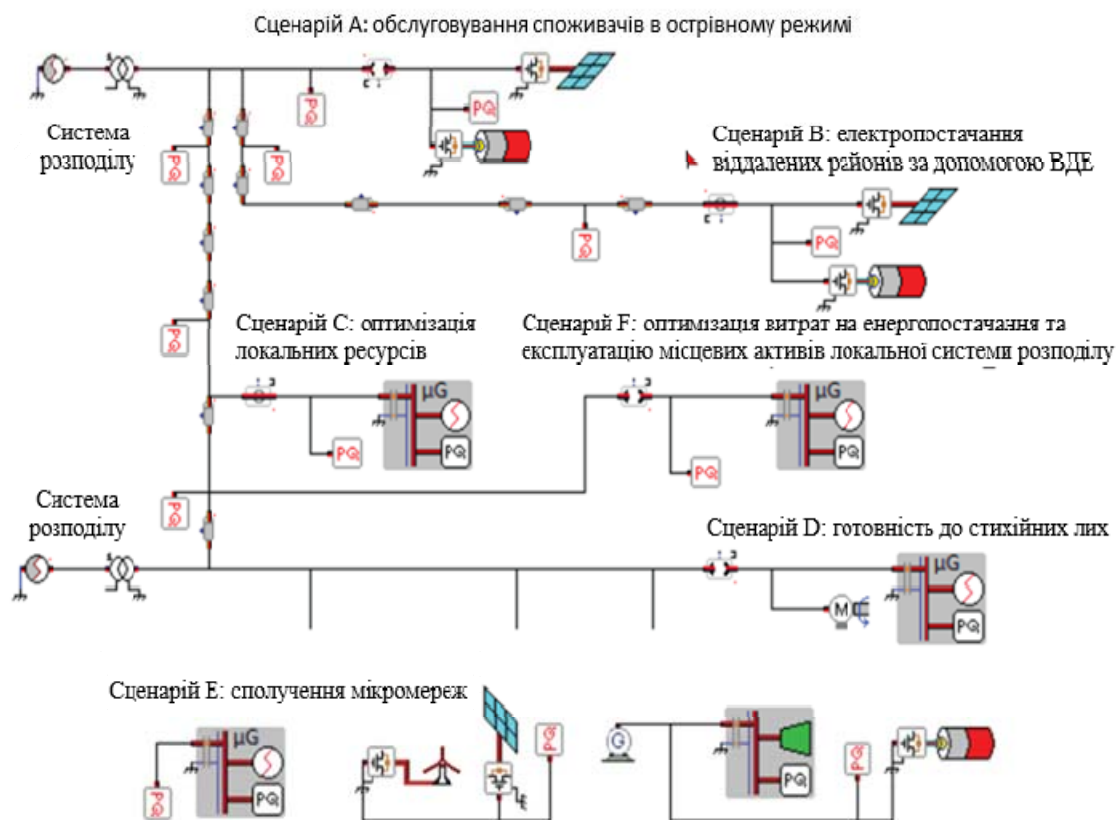


Рис. 2. Схематичне спрощене зображення сценаріїв використання мікромереж в комерційній діяльності (G – генерація, M – вимірювальні пристрої, PQ – навантаження (активне і реактивне), RnE – відновлювані джерела енергії, μG – мікромережа)

BUC E - створення крупнішої енергосистеми завдяки взаємозв'язку декількох ізольованих мікромереж;

BUC F - оптимізація витрат на енергопостачання шляхом належного використання локальних активів у системі розподілу, якою керує громада.

Розглянемо більш детально особливості кожного сценарію використання мікромережі.

Сценарій використання А - гарантування безперервності у роботі навантаження за рахунок можливості переходу мікромережі в острівний режим.

Сфера застосування. Цей сценарій використання стосується ситуацій, коли мікромережа, в основному, працює в режимі паралельної роботи із зовнішньою системою розподілу загального призначення, але також здатна тимчасово відокремлюватися від неї та забезпечувати безперервне електропостачання власних споживачів в ізольованому режимі.

Цілі застосування сценарію А використання мікромережі:

- підвищення надійності електропостачання шляхом забезпечення його безперервності для усіх споживачів або для окремих критичних навантажень;
- забезпечення ефективності застосування енергоресурсів для підтримки безперервності електропостачання споживачам під час припинення живлення від зовнішньої енергосистеми;
- зменшення кількості та тривалості відключень електроенергії для клієнтів мікромережі.

В межах сценарію використання А розглядають три можливі випадки переходу мікромережі в режим організованого енергетичного острова:

- превентивне відокремлення від зовнішньої енергосистеми у випадку запланованого припинення електропостачання (наприклад, через технічне обслуговування) або коли очікується відключення мережі (погодні умови, які можуть пошкодити повітряні лінії, пошкодження третіми особами, переобтяження лінії тощо);
- ненавмисне відокремлення у разі неочікуваного виходу з ладу мережі. Цей сценарій передбачає може автоматичний перехід на власні джерела живлення;

- відновлення електропостачання після аварії в мережі (black-start). Застосовується у випадку, якщо технічні засоби мікромережі не мають можливості автоматично та плавно здійснити відокремлення від зовнішньої енергосистеми без тимчасового знеструмлення споживачів.

Після переходу в острівний режим мікромережа буде працювати в ньому так довго, доки не відновиться постачання електроенергії із зовнішньої енергосистеми, після чого мікромережа знову підключиться до неї в режимі паралельної роботи, або до тих пір, поки локальні джерела живлення будуть здатні забезпечити автономне електропостачання споживачів мікромережі.

Сценарій використання В - електропостачання у віддалених районах за допомогою відновлюваних джерел енергії.

Сфера застосування. Цей сценарій використання стосується наступних ситуацій:

- мікромережа з інтегрованими розподіленими енергоресурсами підключена до зовнішньої енергетичної системи за допомогою переобтяжених або слабких фідерів передачі та розподілу електроенергії;
- ізольована мікромережа, використовуються для цілей електрифікації віддалених сільських районів або географічних островів.

Основні *цілі застосування* сценарію використання В наступні:

- тимчасова локальна електрифікація в районах, що розвиваються, до моменту завершення будівництва основної системи розподілу;
- електропостачання на географічних островах або в районах, де відсутня можливість підключення до основної системи розподілу;
- електропостачання на географічних островах або в районах, де присутня основна система розподілу, але її надійність і якість електроенергії вкрай низькі;
- електропостачання на географічних островах або в районах, де присутня основна система розподілу але вартість електроенергії, що надходить з локальних мікромереж, значно нижче.

Основні функції цього випадку використання включають запуск в режимі black-start, а також регулювання частоти та напруги в мікромережі з метою забезпечення необхідної надійності і якості електропостачання. Додаткові функції можуть включати в себе відключення частини навантаження (load shedding), управління споживанням, прогнозування споживання та генерації електроенергії.

Сценарій використання С - оптимізація використання локальних ресурсів для підвищення надійності та ефективності електропостачання споживачів мікромережі (покращення їх сервісного обслуговування).

Сфера застосування. Цей сценарій використання стосується мікромереж, що працюють паралельно з основною системою розподілу. У сценарії визначаються основні способи використання енергоресурсів для покращення послуг учасникам мікромережі шляхом оптимізації таких ресурсів, як установки зберігання енергії (УЗЕ), диспетчеризовані ВДЕ, управління споживанням задля зниження вартості електроенергії, збільшення обсягів споживаної від ВДЕ енергії, зменшення викидів парникових газів тощо.

Цілі застосування сценарію використання С:

- зменшити витрати на закупівлю енергії для користувачів мікромережі;
- зменшити витрати на монтаж енергосистеми (менші розміри кабелів);
- підвищити обсяги генерації від локальних джерел енергії;
- сприяти інтеграції ВДЕ;
- створити спільноту індивідуальних власників локальних джерел енергії, об'єднаних для забезпечення стабільності частоти та напруги або для створення резервного джерела живлення критичних навантажень (в такій мережі селективний захист від короткого замикання становить більш складну задачу, ніж для звичайної мережі розподілу).

До основних видів послуг, що надаються мікромережею основній системі розподілу, відносять:

- управління генерацією від ВДЕ для запобігання (або обмеження до визначених обсягів) постачання активної енергії в основну систему розподілу;
- управління споживанням реактивної потужності, щоб уникнути плати за потоки реактивної складової енергії з основної системи розподілу. Наприклад, в ВДЕ на сонячній енергії, фотоелектрична система за замовчуванням оптимізована на виробництво лише активної потужності. Таким чином, в точці приєднання мікромережі споживана активна енергія буде зменшена, але реактивна енергія буде споживатися в том самому обсязі, що призведе до погіршення коефіцієнта потужності в точці приєднання мікромережі;
- керування споживанням таким чином, щоб потужність навантаження відповідала сумарній потужності генерації локальних ВДЕ;
- оптимізація використання локальних енергоресурсів (ВДЕ та УЗЕ) відповідно до умов тарифу. Підвищення частки обсягу власних ресурсів генерації мікромережі в обсягах споживання електричної енергії;
- сприяння прямому (peer-to-peer) обміну енергією між користувачами в межах мікромережі (наприклад, за допомогою торгової платформи) з метою збільшення споживання від власних ресурсів. Сприяння інтеграції локальних енергоресурсів в систему електропостачання.

Сценарій використання С стосується мікромереж, які, в основному, використовуються в режимі паралельної роботи з основною системою розподілу електроенергії. За наявності договору між оператором системи розподілу та оператором мікромережі, оптимізація активів мікромережі може надати своїм клієнтам декілька важливих послуг: зниження вартості енергії, збільшення обсягів споживання енергії від локальних джерел, зменшення викидів парникових газів, зниження витрат на підключення до мережі тощо. Однак, досягнення цих цілей значною мірою залежить від нормативно-правової бази, особливо від таких чинників:

- а) наявності чи відсутності двох рівнів обліку та тарифікації електроенергії: на рівні мікромережі у цілому та на рівні окремого споживача;
- б) статусу мікромережі: як споживача, як виробника, або активного споживача (тобто здатної виконувати обидві функції), а також наявності відповідної структури ринку електроенергії для децентралізованого виробництва.

В останньому випадку може існувати кілька варіантів стратегії оптимізації роботи мікромережі, які залежать від положень існуючої нормативної бази в електроенергетиці:

- варіант 1а: оператор мікромережі може продавати профіцит генерації відновлюваної енергії в обмежених або необмежених обсягах основній системі розподілу (залежно від її можливостей). У цьому випадку мікромережа тимчасово розглядається як виробник електроенергії (базова бізнес-модель). У цьому випадку оптимізація здійснюється з урахуванням витрат на купівлю та продаж електроенергії;
- варіант 1б: Оператор мікромережі може передавати профіцит генерації відновлюваної енергії в основну систему розподілу, і при цьому отримати штрафні санкції за кількість переданої енергії (бізнес-модель з урахуванням потенційної небезпеки для роботи енергетичної системи).
- варіант 2: оператор мікромережі не може продавати профіцит власної генерації у систему розподілу (бізнес-модель із дозволом використання джерел розподіленої генерації виключно для покриття власних потреб електроспоживання). Сумарний графік споживання енергії мікромережею повинен підтримуватися на позитивному або нульовому значеннях і не повинна встановлюватися на від'ємних значеннях. Іншими словами, мікромережа має зберігати профіль «споживача», а не «виробника».

У цьому випадку можуть бути застосовані інші рішення щодо керування локальною генерацією для уникнення передавання потужності в зону основній системі розподілу:

- система штрафних санкцій на споживачів за від'ємний напрямок споживання електроенергії (пори́г потужності, її тривалість, ціна тощо);
- моніторинг кривої навантаження споживача в режимі реального часу та надсилання інформаційних або керуючих сигналів споживачу для вчасного регулювання або обмеження виробництва електроенергії;

– застосування алгоритмів планування та платформи прямого (peer-to-peer) обміну енергією для збалансування генерації та попиту на енергію, а також для управління ресурсами.

Слід також враховувати, що сценарій С передбачає реалізацію таких важливих науково-практичних задач, як: забезпечення балансування мікромережі з використанням систем енергоменеджменту [14, 15], регулювання напруги мікромережі, зокрема з ВДЕ та УЗЕ [16], а задачі планування режимів мікромереж розв'язуються із використанням результатів прогнозування відпуску електричної енергії з ВДЕ [17].

Сценарій використання D - оптимізація локальних ресурсів для надання послуг системі електропостачання щодо забезпечення готовності до аварій та якості електроенергії

Сфера застосування. Сценарій використання D стосується громадських мікромереж, що обслуговують такі важливі об'єкти, як лікарні, продуктові магазини, аптеки, сховища під час надзвичайних ситуацій, а також поліцейські відділення та пожежні станції, банки і комунікаційні ресурси. Такі системи енергозабезпечення також називають мікромережами «центру міста» або «оазису» і вони створюються для забезпечення електроенергією багатьох споживачів у разі надзвичайної ситуації (наприклад, шторм, сильний вітер, пожежа, терористичні атаки тощо).

Цілі застосування сценарію використання D включають наступне:

- надання допоміжних послуг для системи постачання електроенергії, такі як регулювання частоти, контроль напруги;
- забезпечення безпеки та безперервності електропостачання спільноти;
- запобігання втраті майна та життя;
- сприяння відновленню енергетичної системи після аварій (підвищення потужності під час black-start (наприклад, допомога в запуску локальних вітрових турбін тощо);
- повторна синхронізація з зовнішньою системою електропостачання.

Сценарій використання D є прикладом того, що мікромережі з ВДЕ та УЗЕ є одним із перспективних рішень для покращення якості електроенергії, надійності та доступності електропостачання для споживачів.

Основні функції сценарію використання D включають в себе аварійний запуск енергетичної системи після аварій, контроль реактивної потужності, регулювання частоти та напруги та автоматичне перемикання потоків енергії. Додаткові функції можуть включати в себе керування пріоритетом живлення споживачів та роботу як віртуальної електростанції для реагування на різні події в мережі (наприклад, допоміжні послуги, зменшення споживання енергії). Це передбачає додатково розв'язання таких задач, як: оптимізація реактивної складової потужності ВДЕ для регулювання режимів системи розподілу [18], керування попитом і побудова моделей функціонування мікромереж у таких умовах [19].

Сценарій використання E – збільшення можливостей енергетичних систем шляхом об'єднання декількох ізольованих мікромереж.

Сфера застосування. Сценарій використання E стосується особливого розвитку енергетичних систем, коли кілька ізольованих мікромереж (або розподілених енергетичних ресурсів) об'єднуються в єдину енергосистему (чи в єдине об'єднання енергетичних ресурсів). Цей сценарій передбачає, що розробка великих енергосистем загального призначення може здійснюватися у два етапи. На першому етапі здійснюється будівництво ізольованих мікромереж, що дасть змогу крок за кроком розвивати місцеву економіку. На другому етапі подальший розвиток енергетичної системи загального призначення буде здійснюватися шляхом об'єднання існуючих мікромереж з подальшим їх приєднанням до систем розподілу загального призначення (рис. 2).

Цілі застосування сценарію використання E включають наступне:

- поетапна оптимізація планування мережі та інвестицій: розвиток енергосистеми, сприяння створенню локальних та ізольованих енергетичних систем на першому етапі, а пізніше на другому етапі об'єднання їх в єдину локальних енергосистему;
- оптимізація обміну енергією між ізольованими мікромережами, навантаженнями та локальними системами розподілу енергії;

- покращення інтеграції відновлюваної енергії в електромережі;
- підвищення якості та надійності живлення;
- забезпечення поступового приєднання нових споживачів.

Сценарій використання F - оптимізація витрат на електропостачання та обслуговування локальних активів у системах розподілу загального призначення шляхом управління локальними ресурсами

Сфера застосування. Цей сценарій використання стосується в неізольованих мікромережах у режимі паралельної роботи із зовнішньою мережею. Він описує комунальні підприємства, що управляються громадою або є у власності громади (також у власності муніципалітету, у власності району, у власності кооперативу тощо), яка володіє або управляє повною частиною загальної системи розподілу на стороні низької напруги розподільчого трансформатора і спрямований на досягнення двох основних цілей:

1) визначення точного обсягу капітальних та операційних витрат на технічне обслуговування та експлуатацію мережевої інфраструктури. Як наслідок, визначення власником мережі обґрунтованих тарифів за користування мережею для її користувачів.

2) сприяння оптимальному використанню локальних енергетичних активів і ресурсів, враховуючі технічний, економічний та екологічний чинники впливу різних технологій генерації та транспортування електроенергії.

Послуги, що надаються користувачам мікромережі, можуть полягати в зниженні вартості користування мережами та енергопостачання, в збільшенні обсягів споживання енергії, виробленої на місці (з відновлюваних або традиційних ресурсів), використання локальних активів для цілей самозабезпечення електроенергією, економія ресурсів в масштабі громади та на прилеглих зонах розподілу, зменшення викидів парникових газів, активне залучення членів громади до застосування інноваційних технологій, пов'язаних з енергетикою (вимірювання, зберігання енергії тощо) та дії, направлені на підвищення енергоефективності (управління попитом) тощо.

Цілі сценарію використання F включають наступне:

- захист користувачів мікромережі від нестабільності цін на енергоносії (стосується тарифів на користування мережею та вартості енергопостачання);
- сприяння використанню енергії, що виробляється на місці, та експлуатації локальних активів;
- зменшення витрат енергії у мережі та оптимізація витрат на експлуатацію та обслуговування мережі;
- мінімізація витрат на транспортування енергії;
- сприяння інтеграції локальних енергетичних ресурсів (спільні проекти побудови ВДЕ та систем накопичення енергії);
- надання послуг оператору системи розподілу загального призначення (якщо існуюча нормативна база дозволяє такі дії);
- оптимізація операційних витрат, зрештою об'єднавши службу з іншими місцевими комунальними підприємствами таких як централізоване теплопостачання, водопостачання, каналізація, утилізація відходів, опріснення тощо.
- розробка інноваційних моделей енергетичного ринку, таких як прямі (peer-to-peer) системи обміну енергією всередині мікромережі.
- оптимізація витрат на енергопостачання та експлуатацію місцевих активів в межах керованої громадою розподільної системи електропостачання шляхом управління локальними ресурсами.

Перспективні для українських систем розподілу сценарії використання.

Аналіз наведених вище сценаріїв використання мікромереж показав, що для України на сьогодні найбільш актуальними є мікромережі наступних типів:

1) неізольовані мікромережі, призначені для підвищення надійності та забезпечення безперервності енергопостачання об'єктів критичної інфраструктури (або їх частин) шляхом переходу в острівний режим з живленням від власних джерел відновлюваної енергії та УЗЕ. Ці мікромережі будують за наведеною на рис.1 топологією, а їх робота відповідає сценаріям

використання С і D. Важливою умовою ефективного використання цих сценаріїв є забезпечення можливості контролю реактивної потужності, регулювання частоти та напруги, автоматичне перемикавання потоків енергії та керування пріоритетом живлення споживачів;

2) неізолювані мікромережі, структура яких спрямована на зниження витрат на електроенергію для їх користувачів шляхом оптимального використання власних ресурсів таких, як джерела розподіленої генерації, УЗЕ та диспетчеризація навантаження. Ці мікромережі також будують за наведеною на рис.1 топологією, а їх робота відповідає сценарію використання С.

Висновки. За результатами досліджень відзначено перспективність впровадження «розумних мереж», зокрема мікромереж, як одного із дієвих механізмів реалізації планів розвитку децентралізованих систем управління в електроенергетиці України. Розглянуто найбільш важливі міжнародні стандарти, які стосуються вимог до архітектури та функцій мікромереж.

За результатами аналізу основних сценаріїв використання мікромереж виділено найбільш перспективні та актуальні напрямки впровадження мікромереж у системах розподілу України. Першочерговою ціллю впровадження мікромереж в українських системах розподілу є оптимізація використання локальних ресурсів для підвищення надійності та ефективності електропостачання споживачів мікромережі (сценарій С згідно IEC TS 62898-1). Такий сценарій використання дозволяє незалежно створювати мікромережі для окремих груп споживачів на основі вимог, які містяться у розглянутих в публікації стандартах, виходячи передусім із власних економічних, соціальних та екологічних інтересів. При цьому впровадження мікромереж для підвищення надійності та оптимізації електроспоживання не вимагає змін як у структурі та функціях систем розподілу, так і у структурі ринку електричної енергії України.

Впровадження та функціонування кількох мікромереж у системі розподілу уможливорює реалізацію сценарію надання оператору системи розподілу послуг з регулювання режимів (сценарій D по IEC TS 62898-1). Сценарій слід розглядати як другий етап розвитку «розумних мереж» за наявності достатньої кількості підключених до системи розподілу мікромереж, які мають власні енергоресурси, доступні для регулювання режимів у системі розподілу. Сценарій передбачає фактичну реалізацію концепції децентралізації управління українськими електроенергетичними системами. Проте успішне впровадження сценарію надання оператору системи розподілу послуг з регулювання режимів потребує як зміни підходів до планування і контролю режимів у системах розподілу, так і удосконалення законодавчої та нормативної бази задля формування принципово нових сегментів ринку електричної енергії України, зокрема в частині створення локальних платформ торгівлі електроенергією між користувачами системи розподілу та пропозиціями послуг регулювання режимів для оператора системи розподілу.

Публікацію підготовлено в межах виконання наукової роботи «Забезпечення ефективного функціонування та розвитку розподіленої енергетики в Україні з використанням технологій мікромереж (шифр: РЕЖИМ-3)» (КПКВК 6541230).

1. Кириленко О.В., Денисюк С.П., Блінов І.В. Цифрова трансформація: сучасні тенденції та завдання. *Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України*. 2023. № 65. С. 5–14. DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2023.65.005>
2. Про ринок електричної енергії: Закон України від 13.04.2017 р. № 2019-VIII. URL: <http://zakon3.rada.gov.ua/laws/show/2019-19> (дата звернення 1.04.2025)
3. Кодекс систем розподілу. Постанова НКРЕКП 14.03.2018 № 310. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/en/v0310874-18?lang=uk#Text> (дата звернення 1.04.2025)
4. 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 1.04.2025)
5. Кириленко О.В., Блінов І.В., Зайцев Є.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. № 63. С. 5–12. DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2022.63.005>
6. IEC/TR 63097:2017 Smart grid standardization roadmap. 2017. 315 p.

7. IEC TS 62898-1: 2017+AMD 1: 2023 Microgrids – Part 1: Guidelines for microgrid projects planning and specification. 2023. 78 p.
8. IEC TS 62898-2: 2018+AMD 1: 2023 Microgrids - Part 2: Guidelines for operation. 2018. 38 p.
9. IEC TS 62898-3-1: 2020 + AMD 1: 2023 Microgrids - Part 3-1: Technical requirements - Protection and dynamic control. 2020. 87 p.
10. IEC TS 62898-3-2:2024 Microgrids - Part 3-2: Technical requirements - Energy management systems. 2024. 70 p.
11. IEC TS 62898-3-3: 2023 Microgrids - Part 3-3: Technical requirements - Self-regulation of dispatchable loads. 2023. 49 p.
12. IEC TS 62898-3-4: 2023 Microgrids - Part 3-4: Technical requirements - Microgrid monitoring and control systems. 2023. 40 p.
13. IEC TS 62898-4: 2023 Microgrids - Part 4: Use cases. 2023. 65 p.
14. Блінов, І., Парус, Є., Шиманюк, П. і Ворушило, А. 2024. 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>
15. Кириленко О.В., Денисюк С.П., Блінов І.В. Енергетичний менеджмент: нові пріоритети XXI століття. *Енергетика: економіка, технології, екологія*. 2024. № 1. С. 7–27. DOI: <https://doi.org/10.20535/1813-5420.1.2024.297508>
16. Блінов І., Трач І., Парус Є., Дерев'янко Д. і Хоменко В. Регулювання напруги та реактивної потужності в розподільних електричних мережах шляхом використання розосереджених відновлюваних джерел енергії. *Технічна електродинаміка*. 2022. № 2. С. 60–69. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2022.02.060>
17. Miroshnyk, V., Shymanuk, P., Sychova, V. Short Term Renewable Energy Forecasting with Deep Learning Neural Networks. *Power Systems Research and Operation. Studies in Systems, Decision and Control*. 2022. Vol 388. Springer, Cham. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-82926-16>
18. Blinov I., Trach I., Parus Y., Khomenko V., Kuchansky V., Shkaruplyo V. Evaluation of The Efficiency of The Use of Electricity Storage Systems in The Balancing Group and The Small Distribution System. 2021 IEEE 2nd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek). 2021. Pp. 262–265. DOI: <https://doi.org/10.1109/KhPIWeek53812.2021.9569981>
19. Жаркін А.Ф., Новський В.О., Мартинов В.В., Пазєєв А.Г. Забезпечення якісного електропостачання в електричних мережах систем розподілу з відновлюваними джерелами енергії. 3б. наук. пр. Нац. техн. ун-т «Харків. політехн. ін-т». Харків: НТУ «ХПІ». 2019. № 20. С. 4–13. DOI: <https://doi.org/10.20998/2409-9295.2019.20.01>

USE CASES OF MICROGRIDS ACCORDING TO INTERNATIONAL STANDARDS

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

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

This publication investigates the foundations of microgrid deployment and their strategic roles within modern distribution systems. The study addresses the evolution of Ukraine's regulatory framework in the context of supporting decentralized energy generation and system operation management. It outlines the critical challenges to be solved in the transition from defining general principles of microgrid development to their practical implementation in the Ukrainian energy sector. A comprehensive review of key international standards governing the design, operation, and functionality of microgrids is presented. The paper highlights typical use cases of microgrids as local energy systems, as defined by these standards, and identifies the prerequisites, objectives, and core functionalities associated with each scenario. Finally, the most relevant approaches to microgrid integration and their practical applications in the Ukrainian context are determined. Bibl. 19, fig. 2.

Keywords: microgrids, use cases, local energy systems, distributed energy resources (DER), renewable energy sources (RES), energy storage systems (ESS).

1. Kyrylenko O., Denysiuk S., Blinov I. Digital transformation of the energy industry: current trends and task. *Pratsi Istitutu Elektrodynamiky NAN Ukrainy*. 2022. № 63. Pp. 5–12. DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2022.63.005>
2. On Electricity Market: The Law of Ukraine 13.04.2017 No 2019-VIII. URL: <http://zakon3.rada.gov.ua/laws/show/2019-19> (Accessed at 21.07.2017) (Ukr)
3. Code of distribution systems. NERC Resolution 14.03.2018 №310. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/en/v0310874-18?lang=uk#Text> (Accessed at 1.04.2025) (Ukr)
4. 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 1.04.2025) (Ukr)
5. Kyrylenko O., Blinov I., Zaitsev Ie., Palachov S., Vasylychenko V. International and European standards implementation for use Smart Grid concept in IPS of Ukraine. *Pratsi Istitutu Elektrodynamiky NAN Ukrainy*. 2022. No 63. Pp. 5–12. DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2022.63.005> (Ukr)

6. IEC/TR 63097:2017 Smart grid standardization roadmap. 2017. 315 p.
7. IEC TS 62898-1: 2017+AMD 1: 2023 Microgrids – Part 1: Guidelines for microgrid projects planning and specification. 2023. 78 p.
8. IEC TS 62898-2: 2018+AMD 1: 2023 Microgrids - Part 2: Guidelines for operation. 2018. 38 p.
9. IEC TS 62898-3-1: 2020 + AMD 1: 2023 Microgrids - Part 3-1: Technical requirements - Protection and dynamic control. 2020. 87 p.
10. IEC TS 62898-3-2:2024 Microgrids - Part 3-2: Technical requirements - Energy management systems. 2024. 70 p.
11. IEC TS 62898-3-3: 2023 Microgrids - Part 3-3: Technical requirements - Self-regulation of dispatchable loads. 2023. 49 p.
12. IEC TS 62898-3-4: 2023 Microgrids - Part 3-4: Technical requirements - Microgrid monitoring and control systems. 2023. 40 p.
13. IEC TS 62898-4: 2023 Microgrids - Part 4: Use cases. 2023. 65 p.
14. I.V. Blinov, Ye.V. Parus, P.V. Shymaniuk and A.O. Vorushylo. 2024. 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>
15. Kyrylenko O., Denysiuk S., Blinov I. Energy management: new priorities of the 21st century. *Power engineering: economics, technique, ecology*. 2024. No 1. Pp. 7–27. DOI: <https://doi.org/10.20535/1813-5420.1.2024.297508> (Ukr)
16. I.V. Blinov, I.V. Trach, Ye.V. Parus, D.G. Derevianko and V.M. Khomenko. 2022. Voltage and reactive power regulation in distribution networks by the means of distributed renewable energy sources. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2022. No 2. Pp. 60–69. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2022.02.060> (Ukr)
17. Miroshnyk V., Shymaniuk P., Sychova V. Short Term Renewable Energy Forecasting with Deep Learning Neural Networks. *Power Systems Research and Operation. Studies in Systems, Decision and Control*. 2022. Vol 388. Springer, Cham. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-82926-16>
18. Blinov I., Trach I., Parus Y., Khomenko V., Kuchanskyy V., Shkarupylo V. Evaluation of The Efficiency of The Use of Electricity Storage Systems in The Balancing Group and The Small Distribution System. 2021 IEEE 2nd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek). 2021. Pp. 262–265. DOI: <https://doi.org/10.1109/KhPIWeek53812.2021.9569981>
19. A. Zharkin, V. Novsky, V. Martynov, A. Paziiev. Provision of high quality power supply in distribution networks with renewable energy sources. *Bulletin of the National Technical University KhPI. Series: Electric Machines and Electromechanical Energy Conversion*, 2019. № 20. Pp. 4–13. DOI: <http://doi:10.20998/2409-9295.2019.20.01>

Надійшла: 21.03.2025

Прийнята: 24.04.2025

Submitted: 21.03.2025

Accepted: 24.04.2025