

МІКРОМЕРЕЖІ: СУЧАСНИЙ СТАН І ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ

І.М. Кучерява, докт. техн. наук

Інститут електродинаміки НАН України,
03057, м. Київ, пр. Берестейський, 56, Україна

e-mail: rB.irinan@gmail.com

У статті представлено огляд концепції мікромережі, її класифікації, основних переваг, принципів побудови та функціонування, засобів генерації електроенергії, систем керування і зберігання енергії. Надано характеристику сучасних промислових мікромереж і окреслено актуальні задачі їхнього подальшого вдосконалення. Узагальнено перспективи і напрямки майбутнього розвитку мікромереж. Бібл. 59, рис. 10, табл. 7.

Ключові слова: енергосистема, мікромережа, острівний режим роботи, розподілені енергетичні ресурси, відновлювані джерела енергії, екологічність, промислові мікромережі, перспективи розвитку.

Вступ. Стрімкий розвиток промисловості в світі, зростання населення і значне збільшення споживання електроенергії з обмеженням джерел енергії обумовлюють першорядність проблеми енергоефективності як ключового виклику енергетики на сучасному етапі. Саме технологія мікромережі (microgrid) має призначення вирішувати задачу енергетичної ефективності шляхом реалізації різних підходів до енергозбереження та використання відновлюваних джерел енергії на доповнення до традиційної генерації електроенергії.

За даними [1, 2] в останні роки обсяг ринку мікромереж зростає майже експоненціально. Прогнозується, що він збільшиться від 10,24 млрд. доларів США у 2025 р. до 52,02 млрд. доларів США у 2037 р. за середньорічного темпу зростання на 13,2 %. У 2025 р. обсяг промислових мікромереж становитиме 11,33 млрд. доларів. Дослідницька фірма Guidehouse очікує, що потужність мікромереж у світі досягне 19888,8 МВт до 2028 р. Північна Америка і

Азіатсько-Тихоокеанський регіон розглядаються як лідери ринку (рис. 1, 2). Повсюди тільки віддалені, комерційні та промислові мікромережі складають 65–70 % від усієї потужності.

Розширення ринку пояснюється швидким економічним підйомом країн, що розвиваються, збільшенням попиту на чисті джерела енергії та дедалі ширшим упровадженням мікромереж для електрифікації сільських місцевостей (віддалених мікромереж). Усього, наприклад, у другій половині 2019 р. в світі було встановлено 4470 мікромереж, що нараховують 25 ГВт запланованої і встановленої потужності [1]. Наразі уряд США прийняв рішення інвестувати 20 млн. доларів на підтримку 17 нових мікромережових проєктів по всій країні [1, 2].

Станом на перший квартал 2020 р. у всьому світі діяло 6610 проєктів мікромереж, що становить 31784,6 МВт [3]. Північна Америка має 36,3 % потужностей. Швидко впроваджує мікромережі бізнес-сектор, що включає комерційні і промислові (C&I) підприємства. На нові компанії в цьому сегменті припадає

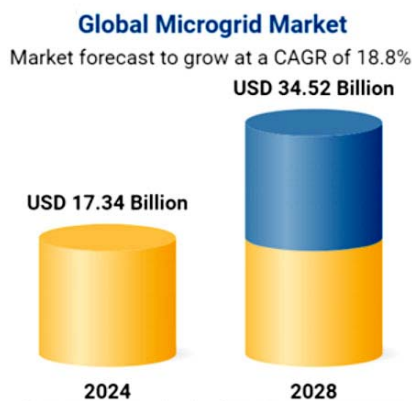


Рис. 1. Обсяг світового ринку мікромереж із прогнозом на 2028 р. (щорічний темп зростання –18,8 %) [2]

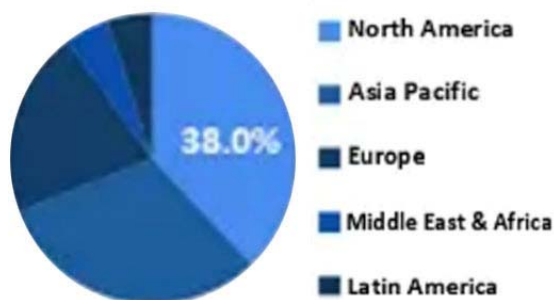


Рис. 2. Розподіл (у %) ринку мікромереж по регіонах світу [1]

85,8 % мікромереж. Найбільшим загальним сегментом у світі є віддалені мікромережі з 36 %, або 11452,2 МВт, за ними йдуть мікромережі C&I з 29,1 %, або 9263,9 МВт. Разом ці два сектори займають 65 % ринку. Відстежено постійне зростання моделі мікромережі "енергія як послуга" у разі власності третьої сторони, що позбавляє клієнтів початкових капітальних витрат. Така модель представляє 87 % нових мікромереж [3].

Розвитку ринку перешкоджають складність і вартість підключення мікромереж до основної енергетичної мережі, відсутність документів стандартизації, високі витрати на встановлення, низька обізнаність споживачів про переваги й особливості мікромереж, нестача технічної підготовки, фінансові та юридичні перешкоди. [1].

Основними компаніями, що працюють на ринку мікромереж, є такі: General Electric Company, Schneider Electric SE, ABB Group, Siemens AG, Toshiba Corporation, Exelon Corporation, Eaton Corporation PLC, Engie SA, Hitachi Ltd., S&C Electric Company, ін. [1, 2].

Численні публікації останніх років, присвячені дослідженню і розвитку мікромереж [4–43], також свідчать про їхню перспективність і щораз більший інтерес до них.

Метою цієї роботи є вивчення та узагальнення інформації відносно сучасних мікромереж з акцентом на промислові мікромережі на основі огляду наявних літературних джерел, а також представлення новітніх технічних і технологічних рішень та напрямків подальшого розвитку і вдосконалення цієї галузі.

Загальна інформація. Мікромережа – це група взаємопов'язаних навантажень і розподілених енергетичних ресурсів із визначеними електричними межами, що утворюють локальну електроенергетичну систему на рівнях розподілу напруги, яка діє як єдиний керований об'єкт і здатна працювати в острівному режимі незалежно від того, автономна вона чи підключена до традиційної енергосистеми [44, п. 3.1.1].

Мікромережа є локальною енергетичною мережею, що надає можливості генерувати власну електроенергію на певному об'єкті і використовувати її за своїми потребами. Для реалізації своїх функцій мікромережа підключає, відстежує та керує розподіленими енергетичними ресурсами (DER – distributed energy resources) об'єкта, забезпечуючи продуктивність, надійність і стійкість.

Можлива робота мікромережі в разі підключення до традиційної енергетичної мережі, тобто паралельно з нею (мережевий режим роботи) або автономна робота у відключеному від енергомережі острівному режимі. Завдяки здатності функціонувати в разі відключенні від традиційної енергосистеми (далі – основна/центральна мережа або основна енергосистема за буквальною перекладом з англійської термінів у використаних першоджерелах), мікромережі можуть посилювати стійкість мережі, сприяти зменшенню в ній збоїв, а також працювати як ресурс мережі для швидшого реагування та відновлення системи. Мікромережі часто спрямовуються на підвищення гнучкості та надійності центральної енергетичної мережі, забезпечуючи працездатність критично важливих навантажень під час перебоїв у мережі. Крім того, мікромережі можуть зменшувати навантаження на центральну мережу в періоди пікового попиту на електроенергію, надаючи у такий спосіб підтримку основній мережі. У разі відключення мережі або виходу її з ладу, у разі надзвичайних ситуацій, власних потреб, а також пікових цін на електроенергію, мікромережа здатна реагувати на це.

Мікромережа поєднує виробництво та споживання електроенергії. На відміну від традиційної енергосистеми, яка генерує електроенергію в централізованому масштабі, а потім розподіляє її довгими лініями електропередачі, мікромережа виробляє електроенергію безпосередньо на об'єкті, використовуючи для цього поєднання, наприклад, резервних дизельних генераторів і відновлюваних джерел енергії – сонячних батарей, вітрову та/або гідроенергію. Мікромережа налаштовується на управління розподіленими енергетичними ресурсами – невідновлюваними джерелами електроенергії (дизельними, газовими генераторами, мікротурбінами, паливними елементами тощо) та відновлюваними джерелами енергії (рис. 3, 4).

Ресурси, що підключаються до мікромережі, можуть бути різними, головним є те, що вони забезпечують основне і резервне живлення об'єктів місцевого рівня. Електропостачання в мікромережі здійснюється завдяки інтегруванню малопотужних джерел із їхнім пристро-

Grid Connected Microgrid Market Share, By Power Source, 2023

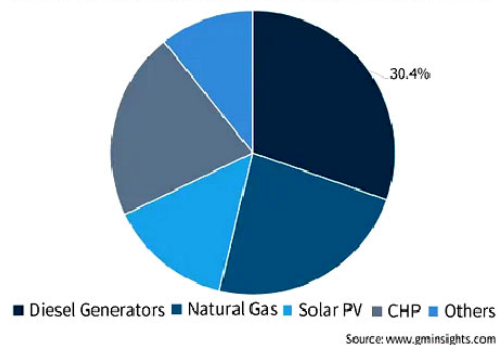


Рис. 3. Розподіл ринку мікромереж за джерелами живлення (дизельні генератори, природний газ, сонячні батареї, ТЕЦ, інші.) станом на 2023 р.

суванням до умов і режимів споживання електроенергії. Для зберігання надлишкової електроенергії, стабільного енергопостачання також і під час відключень мікромережа зазвичай вміщує акумуляторні системи.

Важливим елементом мікромережі є її система енергетичного менеджменту [45] на базі контролерів з функцією контролю й управління режимами роботи, що зокрема дає змогу мікромережі ефективно розподіляти і контролювати внутрішню генерацію, споживання та зберігання електроенергії (позиція 1 на рис. 4). Такі системи дуже гнучкі – у разі виходу з ладу основної енергомережі мікромережа ізолюється і здійснює електропостачання критичних зон. Інтелектуальні системи управління з відповідними методами, спеціальними алгоритмами

і програмним забезпеченням, сучасними інтерфейсами на основі інтернет та розумними засобами обліку електроенергії здатні повністю координувати роботу з центральною мережею, відповідають за оптимізацію, виробництво, зберігання і розподіл енергії, що передбачає прогнозування попиту на електроенергію, регулювання її генерації, а також управління заряджанням і розряджанням акумуляторів.

Мікромережа може розглядатися як своєрідний інтелектуальний мініваріант централізованої системи електропостачання. Відмінні особливості мікромережі: децентралізованість, можливість використання відновлюваних джерел енергії та функціонування незалежно від центральної мережі.

Найбільш привабливими властивостями мікромереж є:

- підвищення надійності електропостачання внаслідок енергетичної стійкості, що реалізується завдяки роботі в острівному режимі та локальній генерації електроенергії, наприклад, від наявних на об'єкті малих генераторів, сонячних батарей, вітротурбін, т. ін.;
- можливість здійснення двостороннього потоку електроенергії, тобто споживання електроенергії з основної мережі та експорт до неї надлишкової енергії;
- за наявності відновлюваних джерел – економія витрат на електроенергію, скорочен-

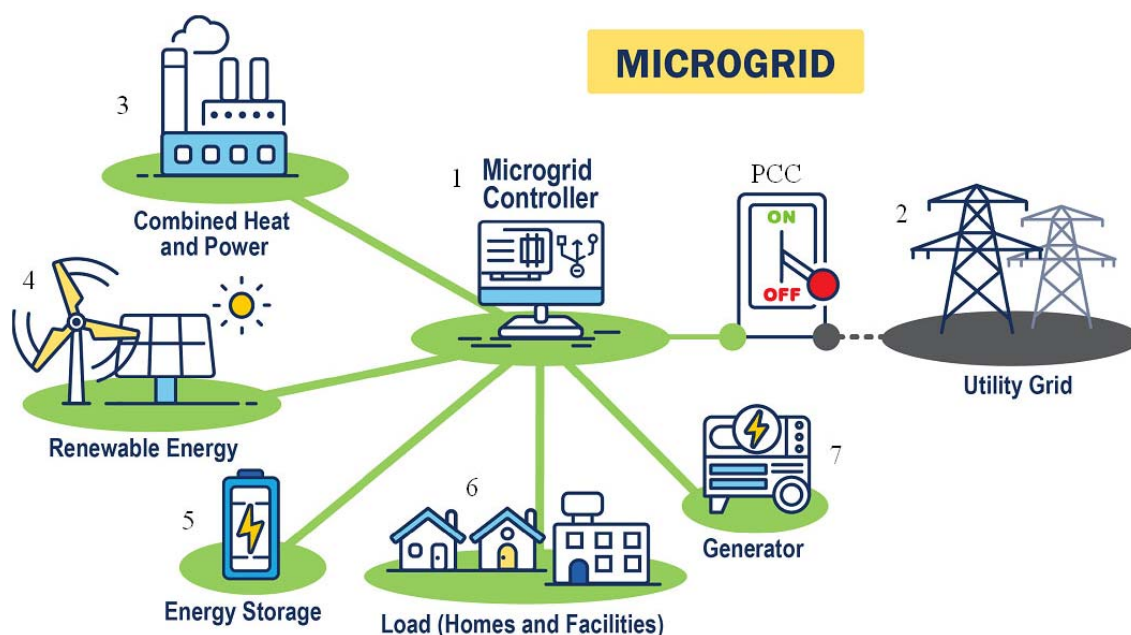


Рис. 4. Схематичне представлення мікромережі [5]. 1– контролер; 2 – основна енергомережа; 3 – комбіновані теплоенергоресурси; 4 – відновлювані джерела; 5 – зберігання енергії; 6 – навантаження (житлові і промислові); 7– генератори; PCC – точка підключення до основної мережі

ня викидів в атмосферу та зменшення впливу на клімат і здоров'я людей, що є особливо важливим для великих об'єктів і промислових підприємств.

Таким чином, мікромережі сприяють сталому розвитку, допомагають реалізації контролю за витратами на електроенергію, зберігають екологію.

Сучасні технологічні рішення для мікромереж дають змогу:

- інтегруватися з технологіями інтелектуальної мережі;
- поєднувати розподілені та відновлювані джерела енергії;
- знижувати пікові навантаження;

– постачати електроенергію на відповідальні об'єкти та об'єкти з критичними потребами (наприклад, у віддалені від основних джерел енергії райони, в ізольовані місця без зв'язків або із слабкими зв'язками з енергосистемою). Зазвичай мікромережі приєднуються до локальної енергетичної компанії як основного джерела електроенергії.

У разі забезпечення електроенергією окремого регіону чи віддаленого населеного пункту мова йде насамперед про *мінімережу*, тобто незалежну локалізовану енергомережу, що може працювати повністю автономно (в острівному режимі) з підключенням відновлюваних джерел енергії.

Мікромережі впроваджуються на рівні промислових підприємств та комерційних парків, університетів, військових баз, центрів обробки даних, бізнес-центрів, постачальників комунальних послуг, торговельних комплексів, офісних будівель. Значними драйверами мікромереж є широкий доступ до електроенергії, економія палива та витрат, зменшення викидів CO₂, паливна незалежність, безперебійне постачання енергії [7].

Головні сучасні тенденції в розвитку мікромереж включають інтеграцію передових технологій накопичення енергії, розробку інтелектуальних мікромереж для покращення контролю та ефективності роботи.

Інтелектуальна мікромережа (smart microgrid) – це вдосконалена мікромережева енергетична система, яка об'єднує цифрові системи зв'язку та управління з традиційною енергетичною інфраструктурою для забезпечення моніторингу та керування потоками енергії в реальному часі. Інтелектуальні мікромережі оптимізують використання відновлюваних джерел енергії, зменшують викиди вуглецю та підвищують енергоефективність. Вони також надають споживачам більший контроль над споживанням енергії та витратами завдяки використанню розумних лічильників і систем автоматизації. Технології, які підтримують інтелектуальні мережі (smart grid), також можна використовувати для підвищення ефективності мікромереж [4]. Інтелектуальна мікромережа використовує датчики, системи автоматизації та керування для оптимізації виробництва, зберігання та розподілу енергії. Інтелектуальні мікромережі стійкі й надійні, здатні швидко реагувати на зміни попиту або перебоїв в електропостачанні.

Слід зазначити, що мікромережі відрізняються від наявних *віртуальних електростанцій* (virtual power plant, VPP) [8, 18–20] – мереж із високим рівнем проникнення розподіленої мікрогенерації насамперед через те, що мікромережі координують та керують доступними ресурсами, зокрема щодо виробництва і споживання електроенергії. Основні відмінності цих мереж показано в табл. 1.

Таблиця 1. Відмінності мікромережі від віртуальної електростанції [18]

Мікромережа	Віртуальна електростанція
Можливість відключення від основної мережі для роботи в острівному режимі	Необхідність підключення до загальнодоступної енергетичної мережі
Передбачається декілька локальних джерел електроенергії з можливостями її зберігання	Можуть інтегруватися ресурси з широкої географічної зони за відсутності накопичення енергії
Відносно невелика встановлена потужність, зосереджена на місцевому споживанні	Набагато більші масштаб і встановлена потужність
Забезпечується підвищення якості електропостачання локальних навантажень без збоїв і перебоїв	Спрямована на плавну інтеграцію великої кількості джерел електроенергії в наявні енергетичні системи

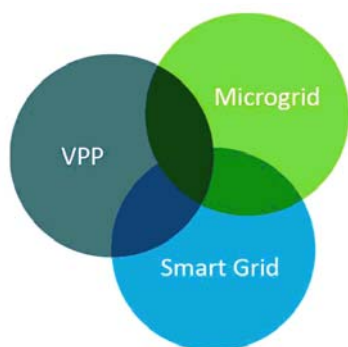


Рис. 5. Ефективна робота мікромережі як частини Smart Grid і VPP [8]

Оптимальна ситуація може скластися, коли мікромережа працює як частина інтелектуальної мережі (smart grid) і віртуальної електростанції (VPP) (рис. 5, [8]).

Основні компоненти і функції мікромережі.

1. Зв'язок з основною мережею. Відповідно до схеми рис. 4 мікромережа має точку підключення до основної мережі – РСС (point of common coupling). Це фізична точка, де мікромережа приєднується або ізолюється від мережі для роботи в острівному режимі. РСС включає в себе різне обладнання та пристрої для полегшення з'єднання, обміну електроенергією, захисту та контролю між мікромережею та основною енергомережею. Сюди входять такі компоненти, як вимикачі, захисні реле та синхронізаційне обладнання. Повністю ізольована мікромережа не має точки РСС.

2. Навантаження (позиція 6 на рис. 4) визначається за призначенням мікромережі з урахуванням: 1) *критично важливих будівель-об'єктів*, що потребують безперервного енергопостачання, мають значні резервні генератори і додаткові ресурси; 2) *некритичних навантажень*, що обслуговуються мікромережею за спеціальною потребою і за більшості умов; 3) *потенційних навантажень*, які можуть час від часу підключатися/відключатися від мікромережі.

Для формування мікромерережі важлива інформація про розташування усіх базових об'єктів-навантажень і відповідних систем живлення для реалізації повного, пікового, середнього або мінімізованого навантаження того чи іншого складового об'єкта.

3. Генерація електроенергії і основне електричне обладнання. Пристрої розподіленої генерації можуть включати, наприклад, фотоелектричну (PV photovoltaic) генерацію, вітрові турбіни, паливні елементи, мікротурбіни. Вони розташовуються в одній мережі та спрямовуються на задоволення місцевого попиту в електроенергії.

Деякі типи пристроїв розподіленого виробництва електроенергії (позиція 7 на рис. 4) [6]:

- дизельні генератори – найбільш поширені енергетичні ресурси для резервного живлення; номінальна потужність від кВт до МВт; вихідна потужність – АС; можуть використовуватися в основному, резервному або безперервному режимі; мають 26–33 % енергоефективності залежно від навантаження;

- газові генератори мають номінальну потужність від кВт до МВт, 24–30 % енергоефективності залежно від навантаження, нижчі викиди, але є дорожчими на 20–100 % від дизель-генераторів;

- сонячні батареї, номінальна потужність – від Вт до МВт, вихідна потужність – DC, 10–30 % енергоефективності; потребують інверторних технологій для перетворення DC–АС та для загальної ефективності енергоперетворення;

- установки вітрової генерації, номінальна потужність – від кВт до МВт, вихідна потужність – АС, 75 % енергоефективності;

- паливні елементи, вихідна потужність – DC; екологічність, використовуються для комбінованих теплоелектричних застосувань;

- мікротурбіни, вихідна потужність – АС; ефективність – 25–30 %; потужність – від 30 кВт до 1 МВт; невеликі розміри і вага, низькі витрати на обслуговування;

- гідроенергетичні ресурси;

- біомаса;

- геотермальна енергія.

Порівняльні характеристики деяких засобів генерації електроенергії в мікромережах показано в табл. 2 [31].

4. Постачання електроенергії здійснюється на основі гнучкої інтеграції відновлюваних джерел (сонця, вітру) із традиційними генераторами енергії (дизельними, газовими тощо), а також з основною енергосистемою для надійного та ефективного енергопостачання.

Саме гібридні системи, що поєднують сонячну, вітрову енергію або мікрогідроелектростанції, особливо в доступних для цього районах, забезпечують стабільність постачання електроенергії.

Таблиця 2. Переваги і недоліки засобів генерації електроенергії в мікромережах

Засоби генерації	Переваги	Недоліки
Дизельні генератори	швидкий запуск; хороша реакція на перехідні режими; зберігання палива	більш висока вартість палива; більші викиди в атмосферу
Газові генератори	висока ефективність палива; менший вплив на довкілля	повільніший запуск; обмежена реакція на перехідні режими; дороге зберігання палива; загальне зростання ціни на паливо
Сонячна енергія	низька вартість обслуговування; різноманітність застосування	залежність від сонця, погоди; необхідність системи зберігання енергії; високі капітальні витрати; необхідність інвертора
Вітрова енергія	незалежність від місця розташування; низька ціна виробництва	залежність від погодних умов; незадовільне візуальне сприйняття; шум
Біогаз	економічно вигідне джерело палива; зменшення забруднення ґрунту/води; побічне добриво	вартість отримання; обробка палива / фільтрація; необхідність відповідної біомаси
Акумуляторні батареї	модифікуємість; миттєва доступність потужності; нейтральність до збереження вуглецю	просторове обмеження; свій строк служби; обмежене зберігання енергії
Паливні елементи	низькі викиди; екологічність; безшумність; застосування для ТЕЦ	дорога екстракція водню; витратна інфраструктура для водню

5. Зберігання енергії (позиція 5 на рис. 4). Система зберігання енергії виконує декілька функцій в мікромережі, зокрема забезпечення якості електроенергії, відслідковування пікового навантаження, регулювання частоти, надання резервної потужності. Ця система відіграє також вирішальну роль в оптимізації витрат мікромережі.

Основні компоненти для зберігання надлишкової електроенергії:

- джерела безперебійного живлення (Uninterruptible Power Supply, UPS) зазвичай встановлюються послідовно з критично важливим навантаженням, підвищують надійність і якість електроенергії, що подається на нього;
- батареї різних технологій, ефективні для швидкого розряду, тривалого зберігання енергії та високої продуктивності протягом багатьох робочих циклів, зокрема Pb-acid, Ni-Cd, Na-S, Li-ion (літій-іонні) батареї;
 - комбіновані батареї, конденсатори;
 - суперконденсатори (ефективність – 90–95 %, потужність – до 300 кВт),
 - гібридні батареї на паливних елементах;
 - насосні гідросистеми;
 - акумулятори енергії стисненого повітря,
 - суперпровідні магніто-енергетичні системи і т. ін.

Зазначимо, що інтерфейси силової електроніки (рис. 6) використовуються для підключення та управління різними компонентами мікромережі, наприклад, генераторами, навантаженнями та накопичувачами. Для того, щоб узгодити вхідну та вихідну напруги одного компонента з напругою мікромережі підтримуються різні етапи перетворення, наприклад, DC-AC, AC-DC, DC-DC.

6. Розподільна інфраструктура складається з системи розподілу електроенергії від джерел до навантажень на місцевому рівні. Такі системи містять лінії електропередачі, трансформатори та комутатори в рамках системи об'єктів мікромережі.

7. Контроль і управління (позиція 1 на рис. 4) здійснюються спеціальними системами, що оснащені сучасним програмним забезпеченням, підвищують енергоефективність, стійкість до відмов і безпеку мікромережі. Управління передбачає захист електричних систем, автоматизацію, кібербезпеку, засоби контролю і візуалізації в реальному часі навантаження і

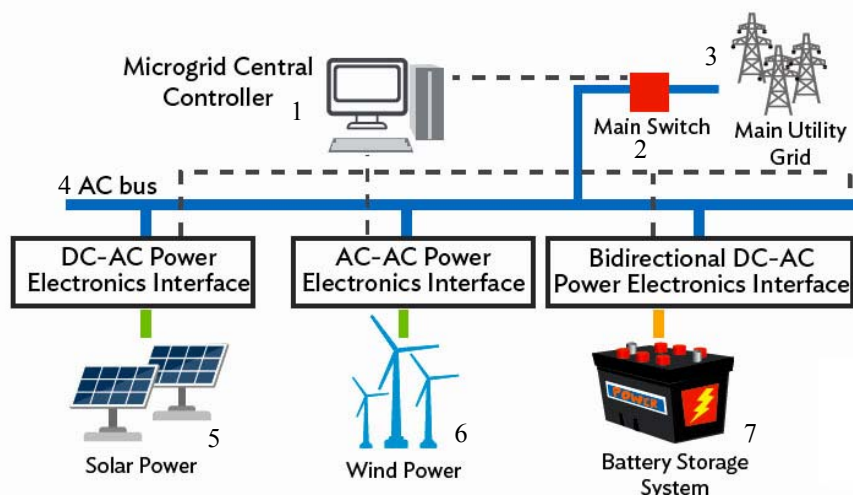


Рис. 6. Приклад використання силової електроніки для ресурсів: сонячних батарей (5), вітроустановок (6) та батарей для зберігання енергії (7) в мікромережі [7]. 1 – центральний контролер; 2 – основний перемикач; 3 – основна енергетична мережа; 4 – АС шина

генерації, інтеграцію з інфраструктурою електричного обладнання, з усіма енергоресурсами, планування енергопостачання, оцінку витрат.

Системи контролю мікромереж будуються за трьома рівнями та зв'язками, показаними на рис. 7 та в табл. 3.

Таблиця 3. Характеристика трьохрівневого контролю мікромереж

Рівні контролю	Коротка характеристика
Первинний	забезпечує надійність роботи та реагування на збої компонентів мікромережі, передбачає відслідковування стабільності напруги і частоти, розподіл електроенергії, контроль роботи захисних пристроїв;
Вторинний	призначається для регулювання напруги та частоти на основі реакцій на змінення навантажень та в системі живлення, зокрема вирівнює напругу і частоту за відхиленнями, виявленими на первинному рівні, здійснює мережеву синхронізацію і контроль на локальному рівні;
Третинний	контроль потоку електроенергії від мікромережі до основної мережі, забезпечується оптимальна робота в різних режимах, проводиться контроль на глобальному рівні і управління в режимі підключення до основної енергетичної мережі.

Застосовуються такі *три режими контролю мікромережі*: 1) master-slave, коли один пристрій/процес (master) контролює один або більше інших пристроїв/процесів (slaves), тобто пристрій/процес здійснює однонаправлене управління підпорядкованим йому пристроєм; такий режим найчастіше використовується для острівної роботи мікромережі; 2) peer-to-peer – однорангове керування або контроль рівноправних вузлів одного над іншим, завдяки чому мікромережа може автоматично визначати, підключати та налаштовувати на роботу нові пристрої; 3) комбінований master-slave і peer-to-peer режим, який і забезпечує стабільну роботу мікромережі.

Архітектура контролю може бути [27, 31]:

- централізованою (центральный процесор збирає всі вимірювання та визначає наступні дії для скоординованої роботи всередині мікромережі);

- децентралізованою (рішення приймаються на рівні окремих компонентів на основі локальних вимірювань і алгоритмів, вбудованих у кожен вузол);

- розподіленою багатоагентною (distributed multi-agent) (це версія децентралізованого підходу, за якого кожен локальний контролер має зв'язок із поряд розташованим, щоб користуватися перевагами централізованої архітектури для всієї мікромережі).

У системі контролю мікромережі контролер і система управління енергією безперервно контролюють роботу мережі за допомогою інструментів зв'язку

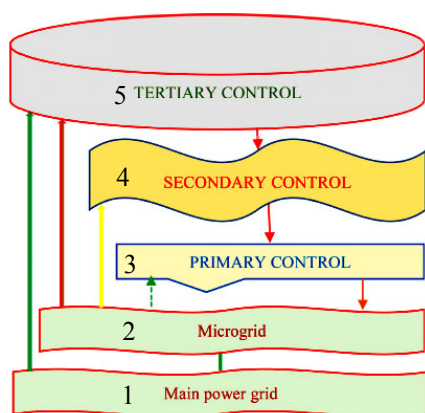


Рис. 7. Ієрархічна схема контролю мікромереж. 1 – основна енергомережа; 2 – мікромережа; 3 – первинний контроль; 4, 5 – вторинний и третинний контроль

та інтелектуальних лічильників енергії, а також здійснюють управління генерацією та диспетчеризацію навантаження на основі критеріїв економічності та надійності.

Класифікація мікромереж. Мікромережі класифікуються (рис. 8 [27, 31]):

1 – за розміром: маломасштабні (до 10 кВт), середньомасштабні (10 кВт – 1 МВт) та великомасштабні (більше 1 МВт) мікромережі;

2 – за застосуванням: високоякісна електроенергія, зниження витрат та гнучко орієнтовані мікромережі;

3 – за роботою: з підключенням до основної енергомережі, робота в перехідному режимі, робота в острівному режимі;

4 – за розподільною системою: DC-, AC- та гібридні мікромережі; (структуру і порівняльні характеристики DC- і AC-мікромереж наведено на рис. 9 і в табл. 4);

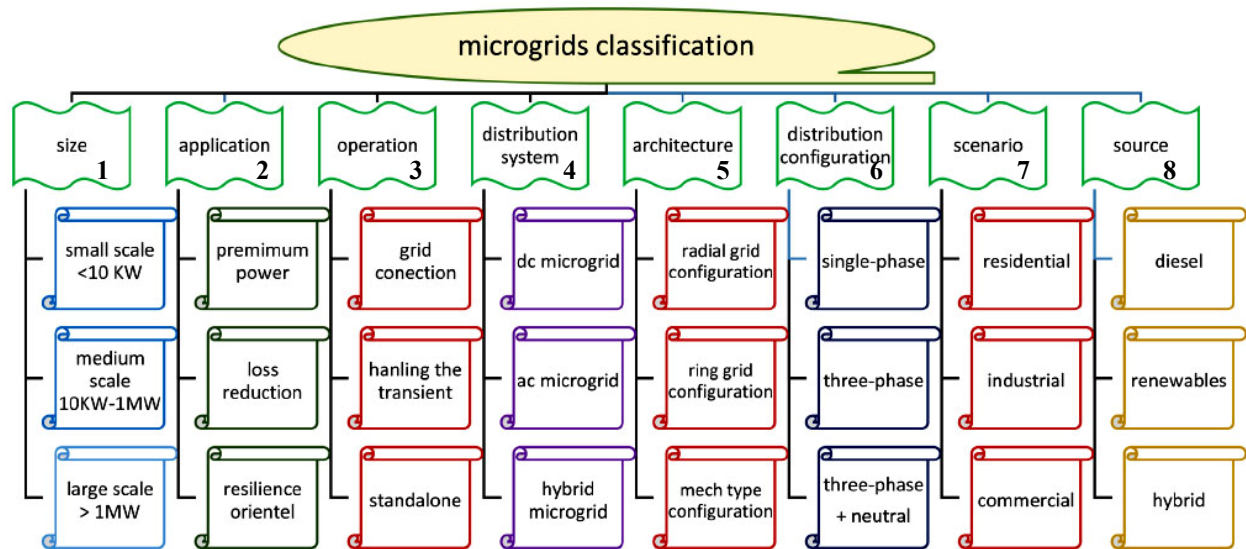


Рис. 8. Класифікація мікромереж [27]

Таблиця 4. Порівняння DC- і AC-мікромереж [27]

Показник	DC-мікромережа	AC-мікромережа
Послідовно з'єднані силові конвертори	Так	Ні
Можливість перекомпоновки наявних засобів	Ні	Так
Стабільність	Незалежна від зовнішніх впливів	Зазнає зовнішніх впливів
Контроль мікромережі	Прості підходи до контролю	Складний процес контролю внаслідок частоти
Пристрої, сумісні з мережею	Ні	Так
Кількість необхідних інтерфейсів силовій електроніки	Середня	Велика
Складність необхідних інтерфейсів силовій електроніки	Прості інтерфейси	Складні інтерфейси
Якість енергії в мережі	Висока	Низька
Легке управління енергозбереженням	Так	Ні
Система захисту	Складна, дорога. Недосконалі компоненти	Проста, дешева. Досконалі захисні схеми

5 – за архітектурою: радіальні, кільцеві і сітчасті (mesh grid) мережі; радіальна мережа використовує магістраль, до якої підключені споживачі електроенергії та пристрої генерації, струм йде в одному напрямку; кільцева конфігурація зазвичай використовується, коли потрібен струм у різних напрямках; конфігурація mesh grid передбачає наявність вузлів для більшої доступності споживачів до електроенергії, водночас ускладнюються інші технічні аспекти, такі як захист, контроль і експлуатація;

6 – за розподільною конфігурацією: однофазні, трифазні мікромережі та трифазні мікромережі з нейтраллю;

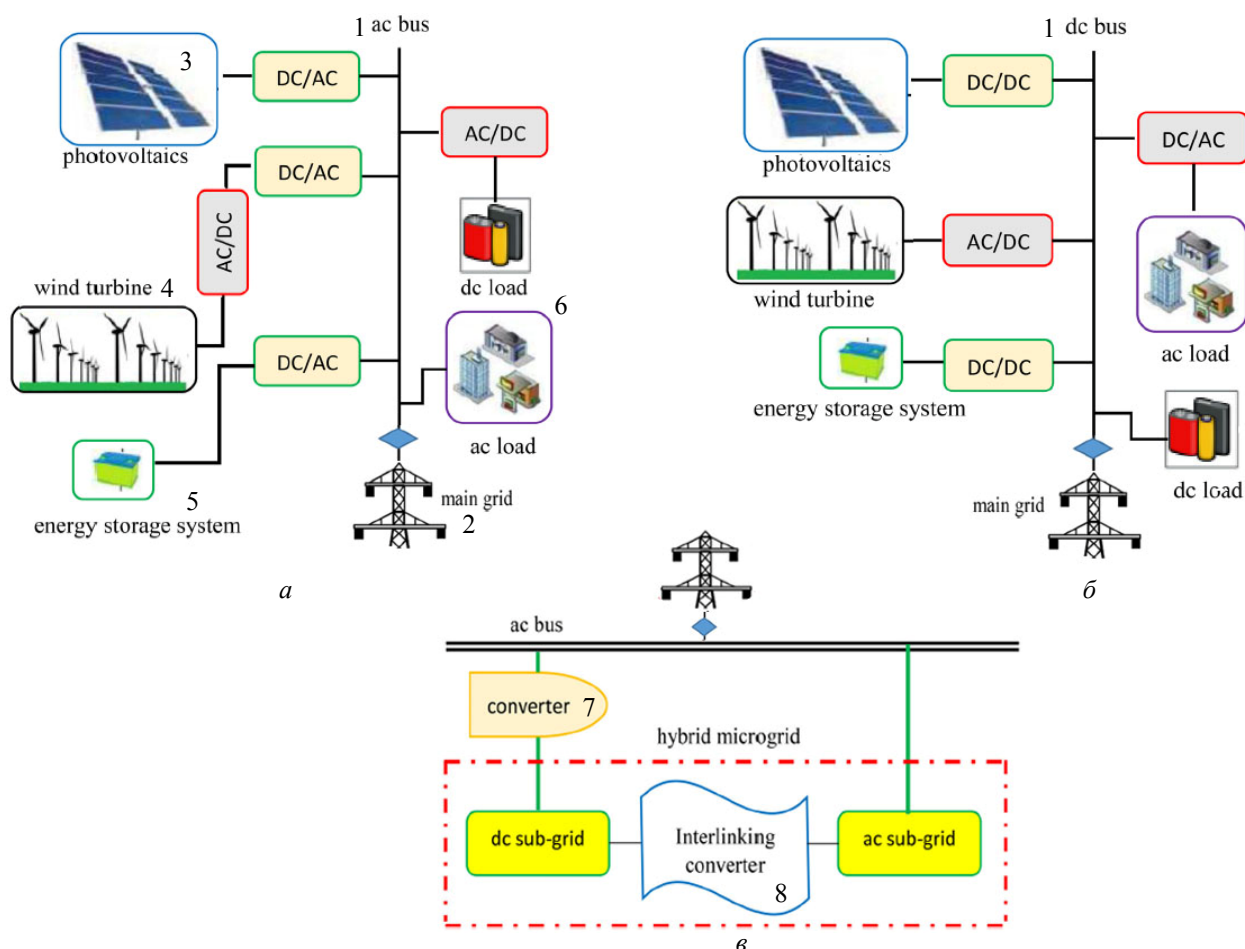


Рис. 9. Структура AC- (а) DC- (б) і гібридної (в) мікромережі [27]. 1 – AC/DC шини; 2 – основна енергетична мережа; 3 – сонячні батареї; 4 – вітрові установки; 5 – система зберігання енергії; 6 – AC/DC навантаження; 7 – перетворювач; 8 – перетворювач для взаємного зв'язку AC- і DC-підмереж

7 – за призначенням: побутові, промислові, комерційні мікромережі;

8 – за джерелами енергії: дизельні, відновлювальні та гібридні.

Промислові мікромережі [10–18, 21, 24, 28, 29, 30, 38]. Використання розподілених енергетичних ресурсів разом із відновлюваними джерелами має особливе значення для промислових об'єктів.

За категоріями генерації об'єкти поділяються на об'єкти мікрогенерації ($\sim 1 \text{ Вт} < 5 \text{ кВт}$), малої генерації ($5 \text{ кВт} < 5 \text{ МВт}$), середньої ($5 \text{ МВт} < 50 \text{ МВт}$) та великої ($50 \text{ МВт} < 300 \text{ МВт}$) генерації.

Переваги та недоліки розподіленої генерації порівняно з централізованим виробленням електроенергії.

Переваги – відсутність вимог, зменшення переривань, короткі терміни монтажу, доступність у модульних елементах, вирішення питань: синхронізація мереж, регулювання частоти і напруги, стійкість і захист, якість електроенергії. Недоліки – вищі витрати на електроенергію, менше розмаїття навантаження, що вимагає збільшення пікової потужності, резервування для гарантованої надійності, підключення за потребою до мережі для резервного живлення і відстеження навантаження. Збільшенню промислових мікромереж сприяють розвиток силової електроніки, систем управління та зв'язку, а також удосконалення проектування та методів експлуатації мікромереж.

Визначення, переваги, характеристики. Промислові мікромережі визначаються дещо по-різному: 1) це група джерел електроенергії, розташованих близько до точок її споживання, 2) сукупність навантажень і мікроджерел, що працюють як єдина система, яка забезпечує тепло- і електроенергію, має необхідну гнучкість завдяки системі управління, 3) або дискретна система на основі відновлюваних і традиційних джерел електроенергії з її зберіганням, системами управління енергією в розумних будівлях промислового призначення [10].

Промислові мікромережі класифікуються за характеристиками розподільної лінії (змінного або постійного струму), а моделі будуються на основі різних параметрів і особливостей, таких як напруга, географія, споживчі та економічні переваги.

До основних переваг промислових мікромереж відносяться підвищення надійності на основі локального розподілення; вища якість електроенергії завдяки управлінню локальними навантаженнями; зменшення викидів вуглецю в разі використання відновлюваних джерел; економічність завдяки зниженню витрат на передачу і розподіл електроенергії.

Тенденції майбутнього розвитку пов'язуються з удосконаленням систем підключення/відключення мікромереж від основної мережі, правильним вибором систем електричного захисту, використанням нових пристроїв (суперконденсаторів і паливних елементів) як гібридних систем зберігання енергії.

Основні промислові мікромережі охарактеризовано в табл. 5 [10].

Таблиця 5. Характеристика основних типів промислових мікромереж

Типи підприємств	Переваги	Недоліки	Методи удосконалення
Нафтогазові	– зменшення викидів CO ₂ ; – можливість гібридних систем накопичення енергії	– чутливі навантаження в обладнанні; – великі навантаження; – високі витрати	– підвищення надійності; – регулювання напруги та частоти; – зниження витрат; – методи захисту; – оптимізація управління; – контроль гібридних систем накопичення енергії; – оптимізація розмірів і розташування елементів мікромережі
Гірничо-видобувні	– можливість повністю острівного режиму; – можливість гібридних систем накопичення енергії	– великі чутливі навантаження; – розташування мікромережі	
Хімічні	– зменшення викидів CO ₂ ; – можливість гібридних систем накопичення енергії	– чутливі навантаження в обладнанні; – великі навантаження; – високі витрати	
Виробничі	– можливість повністю острівного режиму роботи; – можливість використання гібридних систем накопичення енергії	– чутливі навантаження; – переривання у споживанні електроенергії за підключення до мережі; – високі витрати	
Виробництво електроенергії	– відсутність великих навантажень; – легке підключення/відключення від магістральної мережі	– використання постійної напруги для розподілу; – використання чутливих навантажень	

Системи зберігання електроенергії. У напрямку застосування ефективних систем зберігання енергії залишаються питання використання систем на основі батарей; інтеграції в багатопрофільні електростанції відновлюваної енергетики; підключення до промислових мікромереж; оптимізації систем зберігання; зменшення впливу відходів; утилізації після завершення терміну служби батарей.

Основні акумуляторні системи, що використовуються на великомасштабних підприємствах, представлено в табл. 6 [10, 11, 18].

Таблиця 6. Основні сучасні акумуляторні технології на основі батарей

Система зберігання електроенергії – ефективність, потужність	Переваги	Недоліки
Свинцево-кислотні акумуляторні батареї (lead-acid battery) – 70–90 %, до 20 МВт	– низька щільність потужності, – малі капітальні витрати	– обмежений термін служби при повному розряджанні
Літій-іонні акумулятори (lithium-ion batteries) – 75–90 %, до 50 МВт	– висока щільність енергії, – висока ефективність	– висока вартість, – спеціальна схеми заряджання
Натрієво-сірчані акумулятори (sodium-sulfur batteries) – 80–90 %, 0,05–8 МВт	– висока щільність енергії, – висока ефективність	– вартість виробництва, – питання безпеки
Проточні акумулятори (flow batteries) – 75–85 %, 0,3–15 МВт	– висока щільність енергії	– низька ємність

Моделювання і оптимізація промислових мікромереж. Важливим є питання оптимізації мікромереж, особливо в контексті створення математичних моделей з урахуванням технічних обмежень, наприклад, для стратегії динамічного планування використання електроенергії, економічної роботи промислової мікромережі з гнучкими навантаженнями і відновними джерелами, мінімізації витрат на паливо, збільшення відновлених джерел, керування реактивною потужністю тощо [21–24]. У більшості досліджень моделювання проводяться в програмному середовищі MATLAB/Simulink.

Вивчаються підходи до оптимального розміщення відновлювальних джерел генерації електроенергії, що спрямовуються на зменшення втрат потужності, покращення профілів напруги, пошук оптимального розміру та розташування джерел енергії [10, 25]. Оптимізація архітектури мікромережі проводиться відносно розподілу потоків електроенергії та інформації про стан усіх вузлів, мінімізується цільова функція за різними критеріями ефективності (контроль напруги, реактивної потужності, розміщення пристроїв управління, т. ін.), використовуються методи лінійного і нелінійного програмування, динамічного і стохастичного програмування, евристичні методи оптимізації [26].

Напрямки подальшого розвитку:

- підвищення надійності та функціональності з'єднаних та ізольованих мікромереж;
- вдосконалення систем захисту;
- розташування та розміри мікромереж;
- дослідження напруги і частоти в разі підключення до основної енергомережі;
- підключення мікромережі до високовольтної лінії електропередачі постійного струму (HVDC);
- зменшення викидів шкідливих речовин в атмосферу.

Для промислових мікромереж виділяються першорядні задачі (табл. 7 [10]).

Таблиця 7. Актуальні задачі розвитку промислових мікромереж

Задачі	Шляхи вирішення
Оптимізація методів контролю	Вдосконалення методів керування, приладів та обчислювальних методів для промислових мікромереж
Використання високовольтних ліній електропередачі постійного струму для розподілу енергії	Проведення нових досліджень для HVDC розподілу
Оптимізація розмірів і розташування мікромереж	Адаптування і розширення досліджень для промислових мікромереж
Методи контролю для гібридних систем збереження енергії	Дослідження методів контролю для нових технологій зберігання енергії
Аналіз стандартів, правил і практичних підходів, пов'язаних з промисловими мікромережами з використанням відновлювальних джерел	Розширення законодавчої бази та розробка стандартів для промислових мікромереж, їхньої топології та конфігурації.

Україна на шляху до мікромереж. В Україні діє програма Ukraine Facility (2024–2027), і заплановано реформи для подальшого відновлення і розвитку економіки [46]. В енергетичному секторі пріоритетами є енергетична безпека, перехід на низьковуглецеві та відновлювані джерела енергії з постійним розвитком енергетичної стійкості, що відповідає енергетичній стратегії України до 2050 р. [47].



Рис. 10. Карта горизонтального сонячного випромінювання України [46]

Міністерство енергетики України у підсумках 2024 р. зазначило успіхи в розвитку розподіленої генерації. Станом на 31 грудня підключено сумарно 967 МВт об'єктів розподіленої генерації, з яких 835 МВт тільки в 2024 р. Затверджено стратегію розвитку розподіленої генерації до 2035 р. та запущено фінансові програми для підвищення енергонезалежності споживачів, розпочато фінан-

сування проєктів на 8,3 млрд. грн., які забезпечать ~430 МВт нових потужностей [47].

Важливим джерелом відновлюваної енергії України є сонячна енергія (рис. 10), що за прогнозами буде відігравати центральну роль у децентралізованих енергосистемах і надалі більш широко використовуватися завдяки розвитку нових технологій і зниженню витрат.

У місті Мерефа Харківської області знаходиться сонячна фотоелектрична установка, що забезпечувала 10 % річного споживання електроенергії в межах Мереф'янської територіальної громади. У травні 2022 р. фотоелектрична система зазнала ракетної атаки, у результаті чого було пошкоджено 1312 фотоелектричних модулів і суттєво зменшено виробництво електроенергії [48]. Наразі на базі сонячної станції та її розширення в Мерефі створюється мікромережа з компонентами: сонячна електростанція загальною потужністю 4,4 МВт, система зберігання енергії потужністю 2,5 МВт та дві газопоршнєві установки на природному газі по 532 кВт [49].

У Вінницькій області станом на 2023 р. було створено п'ять мікромереж [50]. На сьогодні проводяться пілотний проєкт мікромережі в Миколаївській області [51] та створення мікромережі, за основу якої прийнято газову генерацію та відновлювальні джерела енергії (променева енергія сонця, вітру, гідроенергія річок), для Хмельницької об'єднаної територіальної громади [52]. Введення в дію нових мікромереж дасть змогу підвищити загальну стійкість і незалежність енергосистеми на місцевому рівні, покращити якість електроенергії, знизити її вартість.

Відповідно до розпоряджень Кабінету Міністрів України передбачено реалізацію пілотних проєктів з впровадження мікромереж [53], а метою стратегії розвитку розподіленої генерації до 2035 року визнано модернізацію мережевої інфраструктури, зокрема створення мікромереж на принципах "розумних мереж" [54]

В Україні проводяться наукові дослідження в галузі мікромереж, наприклад, [4, 53–59], впроваджуються міжнародні стандарти й моделі оптимального функціонування [56, 59].

Основні тенденції подальшого розвитку мікромереж [7, 31, 37, 40–43, 45].

– *Проектування і моделювання.* У майбутньому підключення нових джерел живлення, систем зберігання енергії та навантажень, таких як пристрої plug and play*, призведе до складності мікромереж і нових проєктних рішень і підходів до моделювання.

– *Режими роботи.* У цьому напрямку передбачаються дослідження та розробка засобів для гнучкого переходу від сумісної роботи з основною енергосистемою до автономної роботи мікромережі.

– *Захист.* Релейні захисні пристрої можуть виявитися недостатніми, необхідна нова стратегія захисту для безпечної роботи мікромережі в усіх режимах та переходах.

– *Контроль.* У разі змінюваних характеристик робочих елементів мікромережі для її автономного режиму необхідна ефективна методика контролю параметрів системи.

– *Управління енергією.* Узгодження відновлюваних джерел, систем енергозберігання та навантаження є складним процесом, тому потрібна стратегія для економічного використання енергії, що подається від відновлюваних джерел, генераторів та систем енергозберігання.

– *Стабільність* передбачає стратегію ефективного контролю за вирівнюванням (збалансуванням) між генерацією і навантаженням в острівному режимі мікромережі.

– *Енергозберігання.* Критичним питанням буде дослідження потенційного використання систем зберігання енергії з різноманітними функціями для підтримки постійності, стабільності роботи мікромережі.

– *Інтеграція ядерної енергії з відновлюваними джерелами.* У цьому напрямку прогнозуються вивчення і створення гібридних енергетичних систем, розробка технологій зберігання енергії, що можуть ефективно використовувати переваги таких джерел енергії.

* технологія plug and play "ввімкни і працюй" – підключає і автоматично розпізнає нові об'єкти і зовнішні пристрої, вносить відповідні зміни в конфігурацію всієї системи.

– *Складові (мульти-) мікромережі*. Потрібна передавальна та комунікаційна інфраструктури для збалансованої роботи та безперервного постачання енергії на навантаження в декількох зв'язаних між собою мікромережах.

– *Канал зв'язку* передбачає інтегрування інтелектуальних засобів вимірювання та управління мікромережею.

– *Цифровізація (Digitalization)* шляхом створення та впровадження нових моделей та сервісів на основі цифрових технологій; використання нових методів керування, орієнтованих на покращення постачання від відновлювальних джерел генерації, з метою посилення гнучкості енергетичної системи.

– *Бездротові рішення* як альтернативний підхід до еволюції екосистеми електроенергії в сфері її передачі і розподілу, що використовує комп'ютерні засоби і бездротове з'єднання для передачі, обміну даними та підключення до компонентів мережі.

– *Технології Інтернет речей (Internet of Things, IoT)* як концепція мікромережі з інтелектуальними інтерфейсами для взаємного зв'язку і обміну даними між компонентами в автоматичному режимі. Завдяки таким технологіям можливо, наприклад, підвищити ефективність роботи й управління мікромережею. IoT технології, архітектури та додатки розглядаються як ключовий елемент для оновлення та підвищення надійності, стійкості та економічності мікромереж.

– *Хмарні платформи (Cloud platforms)* в рамках мікромереж для доступу і зв'язку з різними ресурсами: комунікаційними мережами, серверами, засобами збереження і обробки даних, обчислювальними сервісами, програмним забезпеченням через Інтернет.

– *Системи штучного інтелекту* з метою отримання всебічної інформації для прийняття рішень, зокрема щодо керування компонентами мікромереж, прогнозування генерації та споживання електричної енергії тощо.

– *Екологічність* – посилення заходів для декарбонізації (зниження викидів вуглекислого газу) та скорочення/уникнення шкідливих речовин.

– *Регулювання і стандарти*. Необхідність загальноприйнятих стандартів, правил та практичних заходів для сприяння і підтримки роботи мікромереж в усьому світі.

Висновки. Наявні нині в світі мікромережі та їхнє подальше вдосконалення розглядаються як ключові умови для створення майбутніх інтелектуальних енергетичних мереж, які дають змогу завдяки повному контролю, ефективності і незалежності розукрупнити енергосистему і забезпечити стабільне постачання електроенергії на будь-якому місцевому рівні.

У статті висвітлюються основні сучасні і перспективні питання та виклики впровадження мікромереж, зокрема промислових мікромереж. Окреслюються важливі аспекти і напрями подальших досліджень у цій галузі. Визначаються першорядні фактори та обґрунтовується значна роль мікромереж у формуванні сталого енергетичного майбутнього та збереженні екології.

Роботу виконано за темою "Забезпечення ефективного функціонування та розвитку розподіленої енергетики в Україні з використанням технологій мікромереж" (шифр: Режим-3).

1. Global micrigrid market trends, forecast report 2025–2037. URL: <https://www.researchnester.com/reports/microgrid-market/3379>
2. Microgrid global market report 2024 URL: https://www.researchandmarkets.com/reports/5939321/microgrid-global-market-report?srltid=AfmBOorGiSMJgmLxJHKFAPlwNmX_sEoI3SgqTznw00cKWjEU_uiVVd7
3. Wood E. North America now top microgrid market due to installations by businesses. April 23, 2020. <https://www.microgridknowledge.com/editors-choice/article/11428971/north-america-now-top-microgrid-market-due-to-installations-by-businesses>
4. Kyrylenko A.V. Intelligent electric power systems: elements and modes. Kyiv: Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2014, 408 p.
5. Microgrid overview. Grid Deployment Office. U.S. Department of Energy, January 2024, 9 p. https://www.energy.gov/sites/default/files/2024-02/46060_DOE_GDO_Microgrid_Overview_Fact_Sheet_RELEASE_508.pdf

6. Fundamentals of advanced microgrid design. Course book for advancing caribbean energy resilience workshop, Sandia National Laboratories, U.S. Department of Energy, May 2019, 58 p. <https://2017-2020.usaid.gov/energy/mini-grids/technical-design/key-steps/fundamentals-advanced-microgrid-design>
7. Handbook on microgrids for power quality and connectivity. Asian Development Bank (www.adb.org). July 2020, 113 p. <https://www.adb.org/sites/default/files/institutional-document/623446/handbook-microgrids-power-quality-connectivity.pdf>
8. Microgrid design guide. Naval Facilities Engineering Command. P 601, December 2016, 88 p. <https://www.wbdg.org/NAVFAC/PPUBB/P-601.pdf>
9. Voices of experience. Microgrids for resiliency. U.S. Department of Energy. National Renewable Energy Laboratory. 2020, 50 p. <https://www.nrel.gov/docs/fy21osti/75909.pdf>
10. Gutiérrez-Oliva D., Colmenar-Santos A., Rosales-Asensio E. A review of the state of the art of industrial microgrids based on renewable energy. *Electronics*. 2022. Vol. 11. Pp. 1002. DOI: <https://doi.org/10.3390/electronics11071002>
11. Viral R., Khatod D.K. Optimal planning of distributed generation systems in distribution system: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2012. Vol. 16. No. 7. Pp. 5146–5165. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.05.020>
12. Ullah, S., Haidar A.M., Hoole P., Zen H., Ahfock T. The current state of distributed renewable generation, challenges of interconnection and opportunities for energy conversion based DC microgrids. *Journal of Cleaner Production*. July 2020. Vol. 273(4). Pp. 122777. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122777>
13. Chandra A., Singh G.K., Pant V. Protection techniques for DC microgrid – a review. *Electric Power Systems Research*, October 2020. Vol. 187. Pp. 106439. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2020.106439>
14. Chaudhary G., Lamb J.J., Burheim O.S., Austbo B. Review of energy storage and energy management system control strategies in microgrids. *Energies*. 2021. Vol. 14. Pp. 4929. DOI: <https://doi.org/10.3390/en14164929>
15. Bektas Z., Kayakutl, G. Review and clustering of optimal energy management problem studies for industrial microgrids. *International Journal of Energy Research*. July 2021. Vol. 45. No. 2. Pp. 103–117. DOI: <https://doi.org/10.1002/er.5652>
16. Chandra A., Singh G.K., Pant V. Protection of AC microgrid integrated with renewable energy sources – a research review and future trends. *Electric Power Systems Research*. April 2021. Vol. 193. Pp. 107036. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2021.107036>
17. Li H., Eseye A.T., Zhang J., Zheng D. Optimal energy management for industrial microgrids with high-penetration renewables. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2017. Vol. 2. Pp. 12. DOI <https://doi.org/10.1186/s41601-017-0040-6>
18. Bandejas F. Microgrid architecture evaluation for small and medium size industries. Escola Superior de Tecnologia de Tomar. Tomar/Novembro/2017, Dissertacao de Mestrado, 141 p. <https://comum.rcaap.pt/handle/10400.26/21510>
19. Zurborg A. Unlocking customer value: the virtual power plant. World Power 2010, 5 p. https://www.energy.gov/sites/default/files/oeprod/DocumentsandMedia/ABB_Attachment.pdf
20. Shabanzadeh M., Eslami S.E., Kazem M., Mahmoud-Reza H. An interactive cooperation model for neighboring virtual power plants. *Applied Energy*, 2017. Vol. 200. Pp. 273–289. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.05.066>
21. Alfieri L., Carpinelli G., Bracale A., Caramia P. On the optimal management of the reactive power in an industrial hybrid microgrid: a case study. In *Proceedings of the 2018 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM)*, Amalfi, Italy, 20–22 June 2018. Pp. 982–989. DOI: <https://doi.org/10.1109/SPEEDAM.2018.8445254>
22. Olivares D.E., Mehrizi-Sani A., Etemadi A.H., Canizares C.A., Iravani R., Kazerani M. Trends in microgrid control. *IEEE Transactions on Smart Grid*, July 2014. Vol. 5(4). Pp. 1905–1919. DOI: <https://doi.org/10.1109/TSG.2013.2295514>
23. Thangam T., Muthuvel K., Kazem H.A. Research perspectives and state-of-the-art methods in photovoltaic microgrids. *World Journal of Engineering*, 2020. Vol. 17. No. 2. Pp. 223–235. DOI: <https://doi.org/10.1108/WJE-06-2019-0181>
24. Li H., Eseye A.T., Zhang J., Zheng D. Optimal energy management for industrial microgrids with high-penetration renewables. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2017. Vol. 2. 14 p. DOI [10.1186/s41601-017-0040-6](https://doi.org/10.1186/s41601-017-0040-6) – <https://typeset.io/pdf/optimal-energy-management-for-industrial-microgrids-with-2060gxgozs.pdf>
25. Tan W.S., Hassan M.Y., Majid S., Rahman H.A. Optimal distributed renewable generation planning: a review of different approaches. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, February 2013. Vol. 18. Pp. 626–645. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.10.039>
26. Fontenot H., Dong B. Modeling and control of building-integrated microgrids for optimal energy management – a review. *Applied Energy*, November 2019. Vol. 254. Pp. 113689, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113689>
27. Shahgholian G. A brief review on microgrids: operation, applications, modeling, and control. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 2021. No. 6. Pp. 12885. DOI: <https://doi.org/10.1002/2050-7038.12885> DOI: [10.1002/2050-7038.12885](https://doi.org/10.1002/2050-7038.12885)

28. Blake S.T., O'Sullivan D.T.J. Optimization of distributed energy resources in an industrial microgrid. 11th CIRP Conference on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering (CIRP ICME), *Procedia CIRP* 2018. Vol. 67. Pp. 104–109. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.12.184>
29. Ahmed M.A., Abbas G., Jumani T.A., Rashid N., Bhutto A.A., Eldin S.M. Techno-economic optimal planning of an industrial microgrid considering integrated energy resources. *Frontiers in Energy Research*. 28 February 2023. Vol. 11. Pp. 1145888. DOI: <https://doi.org/10.3389/fenrg.2023.1145888>
30. Guarnieri M., Bovo A., Giovannelli A., Mattavelli P. A real multitechnology microgrid in Venice: a design review. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, 2018. Vol. 1. Pp. 19–31. DOI: <https://doi.org/10.1109/MIE.2018.2855735>.
31. Uddin M., Mo H., Dong D., Elsayah S., Zhu J., Guerrero J.M. Microgrids: a review, outstanding issues and future trends. *Energy Strategy Reviews*, July 2023. Vol. 49. article 101127 101127. (17 p.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.esr.2023.101127> – <https://vbn.aau.dk/ws/portalfiles/portal/546385539/1-s2.0-S2211467X23000779-main.pdf>
32. Groopman J., Lindstrom J. The open source opportunity for microgrids. Report. Linux Foundation Research, June 2023, 46 p. <https://project.linuxfoundation.org/hubfs/LF%20Research/Open%20Source%20Opportunity%20for%20Microgrids%20-%20Report.pdf>
33. Jägerhag C., Shende V. Grid-connected microgrids: Evaluation of benefits and challenges for the distribution system operator. Department of Electrical Engineering, Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden 2018, 105 p. <https://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/255735/255735.pdf>
34. Dagar A., Gupta P., Niranjana V. Microgrid protection: a comprehensive review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, July 2021. Vol. 149. Pp. 111401. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111401>
35. Chandak S., Rout P.K., The implementation framework of a microgrid: a review. *International Journal of Energy Research*, October 2020. Vol. 45. No. 3. Pp. 3523–3547. DOI: <https://doi.org/10.1002/er.6064>
36. Ma G., Li J., Zhang X.-P. Energy storage capacity optimization for improving the autonomy of grid-connected microgrid. *IEEE Transactions on Smart Grid*, July 2023. Vol. 14. No. 4. Pp. 2921–2933. DOI: [10.1109/TSG.2022.3233910](https://doi.org/10.1109/TSG.2022.3233910)
37. Handbook on microgrids for power quality and connectivity. July 2020, 113 p. <https://www.adb.org/sites/default/files/institutional-document/623446/handbook-microgrids-power-quality-connectivity.pdf>
38. Microgrids for commercial and industrial companies. World Business Council for Sustainable Development, Geneva, Switzerland (www.wbcsd.org), 40 p. <https://www.wbcsd.org/wp-content/uploads/2023/12/Microgrids-for-commercial-and-industrial-companies.pdf>
39. Gaur P., Singh S. Investigations on issues in microgrids. *Journal of Clean Energy Technologies*, January 2017. Vol. 5. No. 1. Pp. 47–51 DOI: <https://doi.org/10.18178/JOCET.2017.5.1.342>
40. Soshinskaya, M., Graus, W., Guerrero, J. M., & Vasquez, J. C. (2014). Microgrids: experiences, barriers and success factors. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014. Vol. 40. Pp. 659–672. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.198>
41. Yang Z., Han J., Wang Q., Zhang K., Deng Y., Yang F., Lei Y., Hu W., Min H. Edge-cloud collaboration-based plug and play and topology identification for microgrids: The case of jingshan microgrid project in Hubei, China. *Electronics*, 2023. Vol. 12(17), 3699; <https://doi.org/10.3390/electronics12173699> – <https://www.mdpi.com/2079-9292/12/17/3699>
42. Upadhyay R., Wadhwa R.K. Internet of Things for cloud services based microgrid program for better power managerial using meditational analysis approach. 2022 11th *International Conference on System Modeling & Advancement in Research Trends (SMART)*. DOI: <https://doi.org/10.1109/SMART55829.2022.10047659>
43. Voumick D., Deb P., Khan M.M. Operation and control of microgrids using IoT (Internet of Things). *Journal of Software Engineering and Applications*. August 2021. Vol. 14(08). Pp. 418–441 DOI: [10.4236/jsea.2021.148025](https://doi.org/10.4236/jsea.2021.148025)
44. Technical specification IEC TS 62898-3-4. Microgrids – Part 3-4: Technical requirements – Microgrid monitoring and control systems. Edition 1.0 2023-08.
45. Kyrylenko O., Denisyuk S., Blinov I. Energy management: new priorities of the 21st century. *Energy: economics, technologies, ecology*, 2024. No 1:75. Pp. 7–27. DOI: <https://doi.org/10.20535/1813-5420.1.2024.297508> – <https://energy.kpi.ua/article/view/297508>
46. Ministry of Economy of Ukraine (2024). Ukraine Facility Plan. <https://www.ukrainefacility.me.gov.ua/en/>
47. Ministry of Energy of Ukraine. Energy Strategy <https://mev.gov.ua/reforma/enerhetychna-stratehiya-0> Results of 2024 – <https://mev.gov.ua/novyna/pidsumky-2024-roku>
48. Merefa community microgrid: supporting distributed energy resource deployment in Ukraine . 2 p. (www.nrel.gov/usaaid-partnership) – <https://www.nrel.gov/docs/fy24osti/89666.pdf>
49. State Biotechnological University. Participation of scientists from the department of EEM in creating a microgrid concept for the community of Merefa. 07/27/2024. <https://biotechuniv.edu.ua/novyny-fakultetu-energetyky-robototekhniki-ta-komp-yuternyh-tehnologij-uk/news-kaf-eem/uchast-naukovtsiv-kafedry-eem-u-stvorenni-kontseptsiyi-mikrogrid-dlya-gromady-m-merefa/>
50. Five "microgrid" networks are created in Vinnytsia region. 09/26/2023. <https://i-vin.info/news/na-vinnichchini-stvoreno-pyat-merezh-mikrogrid-6738.html>

51. USAID Проєкт енергетичної безпеки розробив методологію та концепцію пілотного проєкту мікромережі для одного енергетичного вузла в Миколаївській області. 16.09.2024. <https://www.udg-energy.com.ua/новини/usaaid-проєкт-енергетичної-безпеки-розроб/>
52. Creation of a network (microgrid) for the Khmelnytskyi united territorial community. <https://yourkw.store/news/stvorennnya-merezhi-mikrogrid-dlya-hmilnitskoi-obednanoi-teritorialnoi-gromadi>
53. On approval of the concept for the implementation of "smart grids" in Ukraine until 2035. Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine. October 14, 2022, No 908-r. (paragraph 28). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/908-2022-%D1%80#Text>
54. On approval of the strategy for the development of distributed generation for the period until 2035 and approval of the operational plan of measures for its implementation in 2024–2026. Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine. July 18, 2024, No 713-r. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/713-2024-%D1%80#Text>
55. Zharkin A.F., Palachov S.O., Pazieiev A.G., Malakhata D.O. Assessment of the impact of bidirectional semi-conductor converter on the quality indicators of electric supply in the microgrid. *Tekhnichna Elektrodynamika*, 2024, No 4, Pp. 73–79. <https://doi.org/10.15407/technd2024.04.073>
56. Kyrylenko O.V., Blinov I.V., Parus Ye.V., Trach I.V. evaluation of efficiency of use of energy storage system in electric networks. *Tekhnichna Elektrodynamika*, 2021, No 4, Pp. 44–54. <https://doi.org/10.15407/technd2021.04.044>
57. Kyrylenko O.V., Shcherba A.A., Kucheriava I.M. Intellectual technologies for monitoring of technical state of up-to-date high-voltage cable power lines *Tekhnichna Elektrodynamika*, 2021, No 6, Pp. 29–40. <https://doi.org/10.15407/technd2021.06.029>
58. 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. <https://doi.org/10.15407/technd2024.05.069>
59. Blinov I. V., Trach I. V., Parus Ye. V., Derevianko D.G., Khomenko V.M. Voltage and reactive power regulation in distribution networks by the means of distributed renewable energy sources *Tekhnichna Elektrodynamika*, 2022, No 2, Pp. 60–69. <https://doi.org/10.15407/technd2022.02.060>

MICROGRIDS: CURRENT STATE AND IN PERSPECTIVE

I.M. Kucheriava

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,

Beresteyskyi ave., 56, Kyiv, Ukraine

e-mail: rB.irinan@gmail.com

This paper presents a review of the microgrid concept, classification, basic advantages, principles of the design and operation, electricity generation resources, battery energy storage, microgrid control systems. The up-to-date industrial microgrids are characterized, their actual tasks are given. The perspective issues and important aspects of future microgrid studies are explained. Ref. 59, fig. 10, tables 7.

Keywords: power system, microgrid, island mode, distributed energy resources, renewable energy sources, environmental friendliness, industrial microgrid, prospects for development.

Надійшла: 10.03.2025

Прийнята: 21.04.2025

Submitted: 10.03.2025

Accepted: 21.04.2025

Автор висловлює щирю вдячність д. т. н. О.Д. Подольцеву за те, що привернув увагу до цікавої і актуальної теми дослідження.