УДК 621.311:681.3 DOI: https://doi.org/10.15407/techned2026.04.042

ОГЛЯД СУЧАСНОГО СТАНУ І КЛЮЧОВИХ НАПРЯМІВ РОЗВИТКУ СИСТЕМ ЕНЕРГОМЕНЕДЖМЕНТУ МІКРОМЕРЕЖ

І.М. Кучерява, докт. техн. наук
Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Берестейський, 56, Київ, 03057, Україна,
e-mail: rB.irinan@gmail.com.

Мікромережі здатні забезпечувати підвищену стійкість до кризових ситуацій, особливо в умовах війни або надзвичайних ситуацій, що особливо важливо для України, яка потребує стабільного енергопостачання, надійних та стійких енергетичних рішень. Упровадження сучасних систем управління енергією дає змогу оптимізувати роботу мікромережі. Ці системи аналізують дані про виробництво та споживання енергії в режимі реального часу, допомагають приймати обґрунтовані рішення щодо загального управління, підвищення надійності та стабільності мікромережі, максимізуючи її ефективність та мінімізуючи втрати, сприяють створенню більш стійкої енергетичної моделі. У роботі подано основну інформацію щодо сучасного і перспективного розвитку систем енергетичного менеджменту мікромереж. Обґрунтовано необхідність їхнього розвитку задля сталої та надійної роботи мікромереж. Бібл. 25, рис. 6, табл. 3.
Ключові слова: мікромережа, розподілені енергетичні ресурси, енергетичний менеджмент, відновлювані ресурси, система управління, кластер мікромереж.

Вступ. Важливим фактором ефективної роботи інтелектуальних мереж, а також мікромереж є впровадження сучасних засобів управління енергією та моніторингу роботи складових мереж [1–4]. Система управління і контролю служить мозком мережі, регулюючи складну взаємодію традиційних і відновлюваних енергетичних ресурсів, систем зберігання та навантаження, враховуючи попит на електроенергію, оптимізацію її внутрішніх та зовнішніх потоків потужності, загальну стійкість мережі та вплив на навколишнє середовище (рис. 1 [5]).

Відповідно до [6] «енергетичний менеджмент мікромережі – система забезпечення функціонування та керування навантаженнями і розподіленою генерацією мікромережі». «Система енергетичного менеджменту – система управління, що визначає енергетичну політику та цілі, енергетичні завдання, плани дій та процеси для досягнення цілей та енергетичних завдань» [6]. Стандарт МЕК 61970 визначає систему енергоменеджменту як комп'ютерну систему, що складається з програмної платформи, яка надає базові послуги підтримки, та набору додатків, які забезпечують функціональність, необхідну для ефективної роботи об'єктів генерації та передачі електроенергії з метою забезпечення належного рівня безпеки енергопостачання за умови мінімальних витрат.

Саме система енергетичного менеджменту (СЕМ) мікромережі є ключовим компонентом сучасних мікромереж, основою забезпечення її функціонування, що реалізується на базі сучасних мікроконтролерів та систем інформаційного обміну. СЕМ оснащується сучасним програмним забезпеченням і призначена для підвищення енергоефективності, стійкості до відмов і безпеки мікромережі. Управління мікромережею передбачає захист електричних систем, автоматизацію, кібербезпеку, засоби контролю і візуалізації в реальному часі об'єктів навантаження і генерації, інтеграцію з інфраструктурою електричного обладнання, з усіма енергоресурсами, планування енергопостачання, а також оцінку витрат та

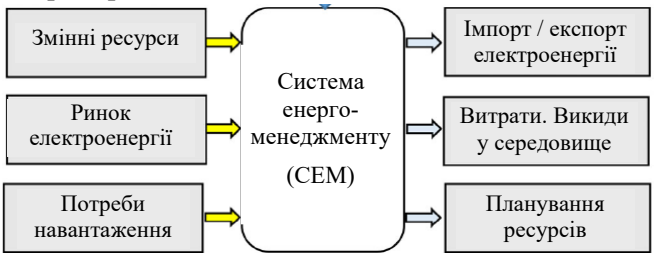


Рис. 1. Основні зв'язки СЕМ [5]

© Кучерява І.М., 2026
© Видавець ВД «Академперіодика» НАН України, 2026
Це стаття відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND 4.0
https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode.uk

важливих економічних і екологічних факторів.

Основними функціями СЕМ мікромережі є наступні [7]: прогнозування виробництва електроенергії; управління розподіленими енергетичними ресурсами; управління навантаженням; планування обсягів генерації електроенергії; керування напругою та реактивною потужністю; статичний аналіз; оцінка економічної вигоди та якості електроенергії.

СЕМ спрямовується також на згладжування піків електроспоживання і компенсацію його провалів. Так в Інституті електродинаміки НАН України розроблено моделі прогнозування навантаження споживачів та відпуску електричної енергії в мікромережах із використанням засобів штучного інтелекту, зокрема штучних нейронних мереж глибокого навчання. Наразі моделі інтегруються у СЕМ, що розробляється [8].

У загальному випадку сучасні СЕМ поділяються за компонентами (апаратне, програмне забезпечення), кінцевим користувачем (промисловий, житловий, комерційний сектор), застосуванням (генерація, передача, моніторинг енергії) і навіть за цільовими групами, географією (країни, регіони). На теперішній час існують складнощі, пов'язані з недостатньо розвиненою структурою СЕМ, які потребують подальшої розробки та раціоналізації [9]. Перш за все, це стосується мікромереж у малорозвинених країнах та країнах, що розвиваються.

У зв'язку з актуальністю вдосконалення систем енергоменеджменту мікромереж [6], використанням таких систем у найновіших інтелектуальних мережах та необхідністю популяризації СЕМ як складової частини енергетичної безпеки України [4, 10], *метою даної роботи* є на основі проведення огляду літературних джерел представити базову інформацію щодо сучасних СЕМ, виявити подальші завдання та перспективи розвитку таких систем.

Задля більшої чіткості та показовості основні дані про СЕМ у статті подаються в узагальненому вигляді за допомогою схем, таблиць, списків, визначень ключових термінів.

Контроль та управління мікромережею [2, 5, 7, 11–20]. Надійна робота мікромережі із значною кількістю розподілених енергетичних ресурсів, особливо в автономному (острівному) режимі, вимагає управління живленням та СЕМ.

За даними [20] структуру СЕМ мікромережі схематично показано на рис. 2. Основні функції СЕМ є комплексними і включають у загальному випадку збір та аналіз даних, оптимальне управління зберіганням, прогнозування, реагування на попит електроенергії, формування сценаріїв, мінімізацію витрат, планування енергоспоживання, підтримку надійності роботи, аналіз стабільності, оптимізацію, генерацію енергії з меншими витратами і викидами, підтримку безпеки за наявності операторно-комп'ютерного інтерфейсу, що діє в режимі реального часу.

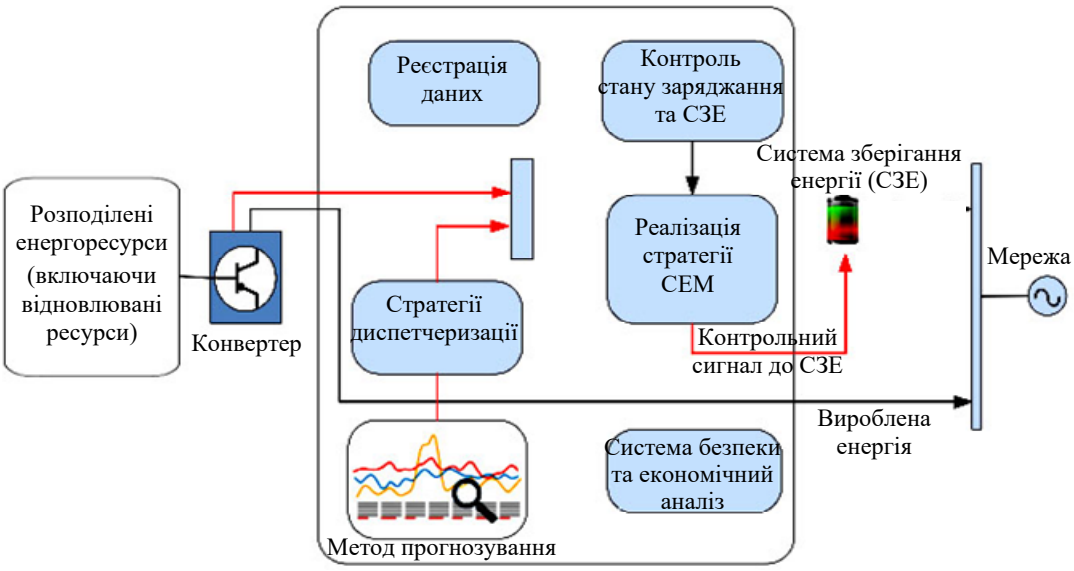


Рис. 2. Структура СЕМ мікромережі [20]

Оскільки до завдань СЕМ входить керування напругою, реактивною потужністю та контроль частоти, швидка реакція СЕМ на робочі ситуації в мікромережі є більш критичною порівняно зі звичайною енергосистемою. Причинами цього є наявність кількох різних енергоресурсів із різною

потужністю та характеристиками; відсутність єдиного потенційно домінуючого джерела енергії під час автономного режиму; швидка реакція електронно пов'язаних блоків енергоресурсів. Саме це може негативно впливати на стабільність напруги [11].

Блок управління СЕМ у режимі реального часу отримує поточні та прогнозовані значення навантаження, генерації та ринкову інформацію для керування потоком потужності, виробництвом енергії, рівнем споживання мережі. СЕМ призначає опорні значення активної та реактивної потужності для блоків енергоресурсів, щоб належним чином розподілити активну / реактивну потужність між ними; реагує на збої та перехідні процеси в мікромережі; проводить балансування потужності та відновлення частоти; за потреби забезпечує повторну синхронізацію мікромережі з центральною мережею.

У режимі автономної роботи вихідна потужність блоків генерації енергії повинна відповідати її загальному споживанню. В іншому випадку мікромережа проводить процес скидання навантаження, щоб привести у відповідність генерацію та споживання електроенергії. Для цього потрібні швидкі та гнучкі стратегії керування активною / реактивною потужністю.

Завдання і цілі енергоменеджменту. СЕМ охоплює низку апаратних та програмних компонентів, призначених для моніторингу, аналізу та управління потоком потужності в мікромережі. Ці засоби спрямовані на досягнення наступних ключових цілей [5, 12, 13, 18]:

– оптимальний розподіл ресурсів для задоволення поточного попиту на енергію, враховуючи такі фактори, як доступність, вартість, вплив на навколишнє середовище;

– балансування навантаження задля безперебійної роботи мікромережі, уникаючи перевантаження або недостатнього використання будь-якого ресурсу;

– безперервність електропостачання та стабільність роботи в острівному режимі або, у разі підключення до центральної мережі, контроль стану мікромережі та за потреби плавний перехід між цими режимами;

– управління накопиченням енергії у разі виробництва надлишку енергії та вивільнення її, коли пропозиція перевищує попит; засоби керування визначають оптимальний час для заряджання та розряджання систем накопичення, щоб максимально подовжити термін їхньої служби та підвищити ефективність [14];

– прогнозування виробництва енергії, споживання та потреби в зберіганні на основі історичних даних та профілів навантаження і таким чином адаптування до змінних умов [15];

– інтелектуальне реагування на попит та споживання енергії з урахуванням ринкових цін, що сприяє загальній стабільності мережі в періоди пікового попиту;

– задоволення екологічних викликів шляхом зменшення викидів вуглецю, що закладається умовою в програмне забезпечення.

Усі наведені завдання передбачають поєднання основ теорії керування, силової електроніки, аналізу даних, протоколів зв'язку та моніторингу в режимі реального часу. З розвитком нових технологій методи штучного інтелекту та машинного навчання все частіше інтегруються в СЕМ задля підвищення їхньої адаптивності та можливості швидкого прийняття оптимальних рішень [15].

В узагальненому вигляді завдання, що вирішує СЕМ, наведені на рис. 3 [18].

Внаслідок різних масштабів часу та пріоритету виконання різних завдань контролю мікромережі функції СЕМ класифікуються за часовим показником і реалізується коротко- або середньо-, або довготерміновий менеджмент (рис. 4).

У відповідності до рис. 4 короткострокове балансування енергії може включати [11]: забезпечення здатності відстеження навантаження, регулювання напруги та частоти на основі розподілу реальної потужності між енергоресурсами та/або скидання навантаження задля зменшення невідповідності потужності; забезпечення прийнятної динамічної реакції та відновлення напруги / частоти під час та після перехідних процесів; дотримання обмежень якості електроенергії чутливих навантажень.

Довгостроковий енергоменеджмент може включати [11]:

– підтримку відповідного рівня резервної потужності під час перепланування розподілених енергоресурсів для: 1) контролю імпорту / експорту енергії з / до центральної мережі; 2)



Рис. 3. Завдання, що вирішує СЕМ [18].

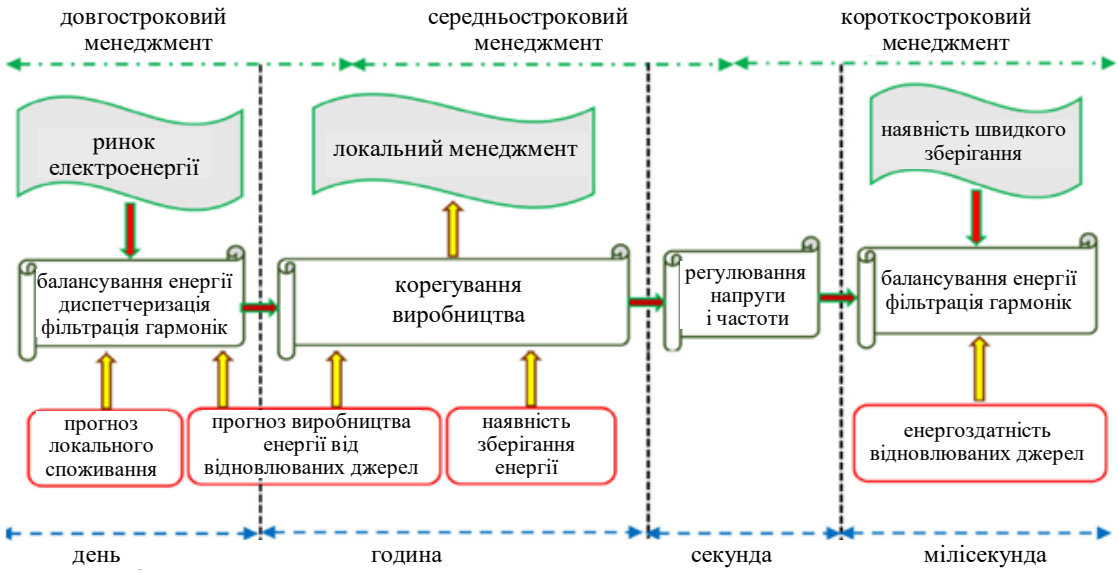


Рис. 4. Класифікація функцій СЕМ за часовим показником [5]

мінімізації втрат енергії; 3) максимізації генерації енергії на основі відновлюваних джерел енергії та / або 4) мінімізації вартості виробництва енергії ресурсами на основі палива;

– врахування конкретних вимог / обмежень кожного розподіленого енергоресурсу, включаючи його тип, вартість виробництва енергії, інтервали технічного обслуговування та вплив на середовище;

– управління реакцією на попит електроенергії та відновлення нечутливих навантажень, які відключені під час перехідних процесів в мікромережі.

Структура контролю СЕМ. Архітектура контролю СЕМ складається з централізованого, децентралізованого та розподіленого контролю (рис. 5, [5, 17, 19–21], табл. 1 [5, 17, 20, 21]), а також ієрархічного контролю (табл. 2 [17, 20]).

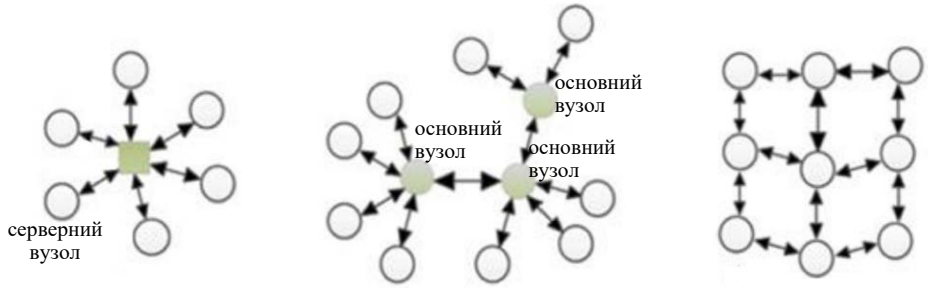


Рис. 5. Типи контролю СЕМ: централізований *(а)*; децентралізований *(б)*; розподілений *(в)* [20]

Централізований контроль відповідає ситуації, коли центральний процесор збирає всі дані та визначає наступні дії для скоординованої роботи всередині мікромережі. Децентралізований контроль передбачає прийняття рішень на рівні окремих компонентів на основі локальних даних, вимірювань і алгоритмів, вбудованих у кожен вузол мікромережі. Розподілений контроль – це версія децентралізованого підходу, за якого кожен локальний контролер має зв'язок із поряд розташованим, щоб користуватися перевагами централізованої архітектури для всієї мікромережі.

Зазначимо, що основними ознаками новітніх СЕМ є управління попитом та споживанням енергії, контроль багатонаправлених енергопотоків, децентралізований контроль, загальне управління всією мікромережею, підключення нових джерел живлення, систем зберігання енергії та навантажень як пристроїв технології *plug-and-play*[*] [22].

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

Ієрархічна структура управління мікромережі, що складається з трьох рівнів – первинного, вторинного і третинного, є необхідною внаслідок часових масштабів та порядку здійснення завдань та опрацювання вимог регулювання (табл. 2).

Таблиця 1. Порівняння різних архітектур контролю СЕМ

Фактори	Типи контролю		
	централізований	децентралізований	розподілений
Власність мікромережі	єдиний власник	багато власників	багато власників
Цілі	чітке єдине завдання	невизначені завдання	чітке єдине завдання
Експлуатаційний персонал	доступний	недоступний	доступний
Гнучкість	менш низька	більш висока	висока
Участь у ринку	складні алгоритми, всі блоки взаємодіють	прості алгоритми, деякі конкурентні	прості алгоритми, деякі конкурентні
Технологія plug-and-play	неможливо	можливо	можливо
Оптимальність	оптимальні рішення	зазвичай суб-оптимальні	оптимальні рішення
Розширення	складне	легке	помірне
Потреби в комунікації on-line	високі	низькі	помірні
Вартість установки	висока	низька	низька
Більш критичне функціонування	можливо	неможливо	низька якість
Відмови чи збої в роботі	у разі однієї несправності	багато несправностей у різних точках	якщо є одна несправна точка
Необхідність центрального контролера	так	ні	ні
Необхідність збору даних	з усіх основних елементів мікромережі	тільки локальна інформація	локальні вимірювання, сусідня комунікація

Таблиця 2. Рівні ієрархічного контролю та їхній часовий діапазон

Часовий діапазон:		
від мікро-, мілісекунд до секунд	хвилини	години – день
Рівні контролю:		
первинний	вторинний	третинний
локальний контроль; контроль розподілу електроенергії; регулювання частоти, напруги, струму; забезпечення надійності роботи та реагування на збої компонентів мікромережі; контроль роботи захисних пристроїв	баланс попиту і генерації енергії; мережева синхронізація; контроль енергопотоків і якості електроенергії; регулювання напруги і частоти на основі реакцій на змінення навантажень та в системі живлення, зокрема вирівнювання напруги і частоти за відхиленнями, виявленими на первинному рівні	управління попитом; контроль мікромережі на глобальному рівні; енергоменеджмент; ціни на електроенергію; економічні фактори; контроль потоку енергії від мікромережі до основної мережі, оптимальна робота в різних режимах (острівний або підключення до основної мережі)

Моделювання та оптимізація роботи мікромереж [4, 17, 18, 20, 21, 23]. Моделювання мікромереж є важливим аспектом їхнього оптимального функціонування, що зосереджується на ефективному управлінні та оптимізації систем розподілу електроенергії. Моделювання є ітеративним процесом, в якому використовується програмне забезпечення та інструменти для уточнення результатів, покращення процесу прийняття рішень, підвищення ефективності роботи мікромереж.

Моделювання розподільних мікромереж здійснюється у відповідності до функцій СЕМ на основі програмного забезпечення, що враховує наступні фактори:

1) топологію, структуру, схему мікромережі, включаючи вузли (підстанції, кабелі), що впливає на потоки потужності в системі; моделювання відображають зв'язки та ієрархію мікромережі;

2) прогнозування навантаження; точне програмування попиту на електроенергію є важливим для планування та експлуатації; моделі інтегрують історичні дані про використання енергії, демографічні тенденції та сезонні коливання для прогнозування очікуваних навантажень;

3) аналіз потоків потужності, виявлення падінь напруги, втрат та потенційних перевантажень;

4) інтеграцію відновлюваних ресурсів (сонячних панелей, вітрових турбін); у моделюванні враховуються змінна генерація та її вплив на стабільність роботи мікромережі;

5) оцінку надійності системи розподілу шляхом моделювання збоїв та перебоїв, виявлення вразливості елементів мережі та реалізацію стратегії підвищення стійкості;

6) підтримку переходу до розумних мереж, включаючи аналітику даних у режимі реального часу та автоматизоване керування задля покращення роботи мікромережі;

7) відповідність нормативним вимогам та економічний аналіз; моделі оцінюють відповідність нормативним стандартам та економічні наслідки інвестицій у модернізацію інфраструктури.

Для оптимального управління СЕМ використовують різні чисельні методи моделювання, які умовно поділяються на три категорії: класичні, метаевристичні та інтелектуальні методи.

Класичні методи програмування вибирають певні змінні для максимізації або мінімізації важливих функції або ряду функцій з урахуванням заданого набору обмежень, використовують як лінійні, так і нелінійні моделі оптимізації для розв'язання задач, які можуть мати обмеження визначеності та невизначеності. У залежності від кількості цільових функцій може реалізуватися одно- або багатоцільова оптимізація (табл. 3).

Таблиця 3. Елементи побудови і розв'язання оптимізаційних задач СЕМ [17, 18].

1.1. *Основні цільові функції*	
Економічні цілі	Прибутковість системи, ціна на електроенергію, мінімізація витрат.
Надійність роботи мікромережі	Мінімізація енергоспоживання, втрати навантаження, оцінка рівня електропостачання
Якість електроенергії	Інтеграція відновлюваних ресурсів, максимізація генерації їхньої електроенергії, мінімізація втрат, баланс попиту-пропозиції електроенергії
Викиди в навколишнє середовище	Викиди парникових газів (CO_2, SO_2, NO_2), витрати на викиди
1.2. *Другорядні цільові функції*	
Підвищення надійності, розподіл електроенергії, техніко-економічний аналіз.	
2. *Обмеження оптимізаційних задач*	
Стабільність генерації електроенергії, технічні обмеження, життєвий цикл системи зберігання енергії, планування енергосистеми, енергобаланс	
3. *Методи оптимізації для розв'язання задач*	
Математичні методи, евристичні та метаевристичні підходи, лінійне та нелінійне програмування, робастне програмування, детерміновані та стохастичні методи, штучний інтелект, прогнозний контроль	

Метаевристика включає алгоритми випадкового розв'язку задачі оптимізації з обмеженнями або без них. Метаевристичний підхід працює на двох концепціях – інтенсифікації та диверсифікації. Інтенсифікація – це пошук локальної області задля знаходження оптимального рішення, коли відомо, що воно може бути знайдено в заданій області. Диверсифікації – це пошук простору в глобальному масштабі без обмежень з використанням випадково згенерованих змінних.

Інтелектуальні методи в СЕМ складаються з нечіткого управління та нейронних мереж, методів теорії ігор та глибокого навчання. Наприклад, нечітке логічне управління застосовується задля покращення стану заряду акумулятора, згладжування профілю напруги. Глибоке навчання (*deep learning*) на основі штучних нейронних мереж спрямовується на досягнення динамічного регулювання енергетичного потоку, скорочення викидів парникових газів, посилення захисту мікромережі [20]. Теорія ігор (*game theory*) – це теорія математичних моделей прийняття оптимальних рішень в умовах конфлікту, зазвичай, в умовах невизначеності. Задля розв'язання оптимізаційних задач поєднуються декілька змінних прийняття рішення в одній математичній моделі для участі в грі. Теорія ігор може бути використана задля визначення оптимальної ціни на електроенергію для споживачів шляхом регулювання ємності системи зберігання, задля оптимального планування СЕМ зниження загальних витрат, прогнозування виробництва відновлюваної енергії з використанням великого набору даних [20].

Допоміжні інтелектуальні елементи СЕМ [4, 6, 20, 23]**.** Останні технологічні досягнення значно підвищують ефективність мікромереж, позиціонуючи їх як важливі компоненти переходу до більш стійкої та надійної енергетичної системи. Ключові інновації включають інтеграцію інтелектуальних мереж, Інтернету речей та штучного інтелекту, кожна з яких сприяє створенню більш чутливої та адаптивної мікромережі.

Інтернет речей (IoT) є важливим компонентом в управлінні енергією в мікромережі, забезпечує ефективні послуги моніторингу, вимірювання та управління, з'єднує фізичні та цифрові компоненти без будь-якого посередництва оператора. Пристрої *IoT*, такі як інтелектуальні

лічильники та датчики, збирають і передають дані про моделі споживання енергії, умови навколишнього середовища та роботу обладнання. Цей підхід дає змогу операторам приймати обґрунтовані рішення, оптимізувати розподіл енергії та вирішувати питання технічного обслуговування (наприклад, сприяти профілактичному технічному обслуговуванню; за аналізом показників продуктивності попереджати операторів про потенційні проблеми), а також дає можливість споживачам контролювати своє енергоспоживання в режимі реального часу, сприяючи більшій економії енергії. Перевагою є користування інтелектуальною системою обліку, що за визначенням є «автоматизованою системою, яка інформаційно об'єднує інтелекттуальні лічильники та забезпечує приймання, обробку та передавання вимірюваної та іншої інформації каналами зв'язку для цілей проведення комерційних розрахунків, моніторингу та контролю» [6].

Штучний інтелект (ШІ) все частіше використовується в роботі мікромереж для інтелектуального прийняття рішень. Алгоритми ШІ можуть аналізувати великі обсяги даних, зібраних з пристроїв *IoT*, для виявлення тенденцій, прогнозування попиту на енергію та оптимізації розподілу ресурсів. Моделі машинного навчання можуть прогнозувати коливання у виробництві енергії з відновлюваних джерел, що дає можливість коригувати роботу мікромереж. Крім того, ШІ може забезпечувати швидке реагування на перебої в роботі за допомогою автоматизованих процесів виявлення та усунення несправностей.

Інтеграція квантових комп'ютерів дає змогу обробляти величезні об'єми даних одночасно (а не послідовно), відновлювати СЕМ більше навантажень за короткий період, використовувати методи глибокого (машинного) навчання задля вдосконалення моделей прогнозування, а також застосовувати алгоритми для швидкого управління енергоресурсами.

Управління даними і кібербезпека задля забезпечення їхньої операційної цілісності, захисту від потенційних загроз несанкціонованого доступу та порушень, конфіденційності інформації, оскільки зі зростанням пристроїв Інтернету речей та інтелектуальних технологій мікромережі стають потенційними цілями для кібератак. Стратегія кіберзахисту спрямовується на впровадження брандмауерів, систем виявлення вторгнень та постійного моніторингу доступу до даних в реальному часі.

Кластери мікромереж [23, 24] – перспективне рішення для сучасних енергетичних систем. Декілька мікромереж можуть утворювати кластер і функціонувати у взаємозв'язаному режимі, коли кожна окрема мікромережа (або кластер у цілому) отримує збільшення потенційних переваг за рахунок такого об'єднання. Взаємні зв'язки та використання сильних сторін мікромереж у кластерах сприяють підвищенню надійності, оптимізації використання енергії, ефективній інтеграції енергоресурсів, вирішенню економічних питань. Для цього необхідною є скоординована робота мікромереж як на рівні розподілу енергії, так і на рівні управління. Один із варіантів ієрархічної структури управління мікромережами показано на рис. 6.



Рис. 6. Варіант системи трирівневого управління двох об'єднаних мікромереж

Напрямки подальших досліджень у контексті СЕМ мікромереж [1, 5, 11, 13, 17–25].

– *Проєктування* – можливості розширення мікромережі, підключення нових джерел живлення, систем зберігання енергії та навантажень як пристроїв *plug-and-play*.

– *Апаратне забезпечення* – використання контролерів мікромереж, тестованих в контрольованих лабораторних умовах за технологією «апаратне забезпечення в циклі» (у реальному часі); удосконалені блоки розподіленої генерації з інтерфейсом інвертора, що зв'язано з координацією реле захисту як у режимі підключення до центральної мережі, так і в автономному режимі (наразі це питання відноситься до сфери активних досліджень).

– *Контроль* – ефективні методи контролю усіх параметрів, регулювання напруги та частоти, якості енергії, синхронізація між автономною роботою і з підключенням до центральної мережі.

– *Режими роботи* – плавний перехід між підключенням до мережі та автономним режимом за високого рівня розподіленого виробництва енергії; проблема чорного пуску (*black start*) в незбалансованій системі з точки зору управління, захисту та якості електроенергії для запуску основного обладнання та відновлення після знеструмлення електропостачання споживачів.

– *Методи* – удосконалення регулювання частоти та напруги в різних режимах роботи.

– *Управління* – підключення та узгодження відновлюваних джерел, систем енергозберігання та навантаження; управління елементами постійного та змінного струму.

– *Стабільність* – ефективний контроль балансу між генерацією і навантаженням в острівному режимі роботи мікромережі.

– *Моделювання* – впровадження програм з використанням інтелектуальних методів (глибокого навчання на основі штучних нейронних мереж та теорії ігор).

– *Багатоцільова оптимізація* – управління енергією з урахуванням ряду економічних, технічних, екологічних аспектів і обмежень та з використанням гібридних алгоритмів оптимізації як альтернативи одному методу оптимізації.

– *Кластери мікромереж* – проблеми в цьому напрямку: оптимізація управління, комунікація і безпека декількох зв'язаних між собою мікромереж з перспективою досягнення стійких та децентралізованих енергетичних систем.

– *Інфраструктура управління* – впровадження та поширення Інтернету речей, хмарних платформ, штучного інтелекту, інтеграції квантових комп'ютерів, удосконалення кібербезпеки.

– *Моніторинг даних у реальному часі* – використання датчиків Інтернету речей та інтелектуальних лічильників, що є елементами для перетворення звичайного з'єднання між споживачем та оператором на інтелектуальну взаємозалежну систему зі швидшим та надійнішим зв'язком.

– *Перехід до інтелектуальної енергетичної системи* – перетворення мікромережі на систему, що працює автономно, з цифровими технологіями, автоматизацією, перевагами у плані надійності та безпеки.

– *Економічні та екологічні аспекти* – зменшення витрат та викидів парникових газів.

– *Нормативи і стандарти* – відповідність умов і параметрів до діючих стандартів для сприяння і підтримки роботи мікромережі; усунення недоліку, який складається з відсутності стандартних процедур технічного обслуговування, що впливає на стійкість мікромережі.

Висновки. У теперішній час вдосконалення систем енергоменеджменту мікромереж розглядається як одна з ключових умов створення майбутніх інтелектуальних енергетичних мереж, що забезпечать стабільне та якісне постачання електроенергії на будь-якому місцевому рівні.

У роботі висвітлюються основні сучасні й перспективні питання та виклики відносно систем енергоменеджменту мікромереж, окреслюються першорядні фактори і напрямки майбутніх досліджень цих систем задля забезпечення більш просунутого та надійного управління енергією в мікромережах.

Системи енергоменеджменту сучасних мікромереж можна вважати концепцією, що продовжує удосконалюватися зі створенням і розвитком технологічних інновацій, і в подальшому буде призводити до розширення і покращення роботи самих мікромереж.

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

REVIEW OF CURRENT STATE AND KEY DEVELOPMENT TRENDS OF MICROGRID ENERGY MANAGEMENT SYSTEMS

I.M. Kucheriava
Institute of Electrodynamics National Academy of Sciences of Ukraine,
56, Beresteiskyi Ave., Kyiv, 03057, Ukraine. E-mail: rB.irinan@gmail.com.

Microgrids are intended for providing the enhanced resilience to crises, particularly in times of war or emergencies, which is especially important for Ukraine, a country in need of a stable energy supply and reliable energy solutions. The implementation of updated energy management systems allows for the optimization of microgrid operations. These systems analyze data on energy production and consumption in real time, make reasonable decisions regarding overall management and enhance the reliability and stability of the microgrid, maximizing its efficiency, minimizing losses and contributing to the development of a more sustainable energy model. This article presents key information on the current and future development of energy management systems for microgrids. It supports the need for their development to provide the sustainable and reliable operation of microgrids. References 25, figures 6, tables 3.

Keywords: microgrid, distributed energy resorces, energy management, renewable energy sources, control system, interconnected multi-microgrids.

1 Blinov I.V., Denysyuk S.P., Zhujkov V.Y., Kyrylenko O.V., Kyseleva A.G., Lukyanenko L.M., Osypenko K.S., Pavlovskii V.V., Parus Ye.V., Sopel M.F., Stelyuk A.O., Tankevych S.E. Intelligent electric power systems: elements and modes. Kyiv: Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2014, 408 p. (Ukr)

2. 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. (Ukr)

3. 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. DOI: https://doi.org/10.15407/techned2021.06.029. (Ukr)

4. Analysis of the application of microgrids in Ukraine. Recovery and reform support team at the Ministry of energy of Ukraine. Analytical work. October 2025. Kyiv. 70 p. URL: https://www.mev.gov.ua/sites/default/files/2025-10/mikromerezhi-ua_0.pdf (Ukr) (accessed at 15.03.2026)

5. Shahgholian G. A brief review on microgrids: operation, applications, modeling, and control. International *Transactions on Electrical Energy Systems,* 2021. No 6. P. 12885. DOI: https://doi.org/10.1002/2050-7038.12885.

6. On energy efficiency: The Law of Ukraine 21.10.1021 No 1818-IX. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1818-20#Text (accessed at 10.02.2026). (Ukr)

7. Blinov I., Palachov S., Parus Ye., Klymenko O. Functions of up-to-date microgrid energy management systems under grid-connected operation in compliance with international standards. *Pratsi Instytutu Elektrodynamiky NAN Ukrainy.* 2025. Vyp. 71. Pp. 15–27. DOI: https://doi.org/10.15407/publishing2025.71.015. (Ukr)

8. Distributed energy and microgrids. *Svit newspaper*. April 2, 2025. https://svit.kpi.ua/2025/04/02/розподілена-енергетика-та-мікромере/ (accessed at 12.02.2026) (Ukr)

9. Shafiullah M., Refat A.M., Haque M.E., Chowdhury D.M.H., Hossain M.S., Alharbi A.G., Alam M.S., Ali A., Hossain S. Review of recent developments in microgrid energy management strategies. *Sustainability.* 2022. Vol. 14(22). Article no: 14794. DOI: https://doi.org/10.3390/su142214794.

10. Guide to the implementation of an energy management system in accordance with the requirements of the international standard ISO 50001:2018. UNIDO, 2021. 137 p. (Ukr)

11. Katiraei F., Iravani R., Hatziargyriou N., Dimeas A. Microgrid management. Controls and operation of microgrids. *IEEE Power & Energy Magazine.* 2008. Vol. 6(3). Pp. 54–65. DOI: https://doi.org/10.1109/MPE.2008.918702.

12. Ndeke C., Adonis M., Almaktoof A. Energy management strategy for a hybrid micro-grid system using renewable energy. *Discover Energy.* 2024. Vol. 4:1. DOI: https://doi/org/10.1007/s43937-024-00025-9.

13. Allwyn R.G., Al-Hinai A., Margaret V. A comprehensive review on energy management strategy of microgrids. *Energy Reports*. 2023. Vol. 9. Pp. 5565–5591. DOI: https://doi.org/10.1016/j.egyr.2023.04.360.

14. Bharatee A., Ray P.K., Subudhi B., Ghosh A. Power management strategies in a hybrid energy storage system integrated AC/DC microgrid: a review. *Energies*. 2022. Vol. 15. No 19. Article no: 7176. DOI: https://doi.org/10.3390/en15197176.

15. Joshal K.S., Gupta N. Microgrids with model predictive control: a critical review. *Energies*. 2023. Vol. 16. No 13. P. 4851. DOI: https://doi.org/10.3390/en16134851.

16. Bihari S.P., Sadhu P.K., Sarita K., Khan B., Arya L.D., Saket R.K. A comprehensive review of microgrid control mechanism and impact assessment for hybrid renewable energy integration. *IEEE Access*. 2021. Vol. 9. Pp. 88942–88958. DOI: https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3090266.

17. Elmouatamid A., Ouladsine R., Bakhouya M., El Kamoun N., Khaidar M., Zine-Dine K. Review of control and energy management approaches in micro-grid systems. *Energies.* 2021. Vol. 14 (168). 30 p. DOI: https://doi.org/10.3390/en14010168.

18. Zahraoui Y., Alhamrouni I., Mekhilef S., Basir Khan M.R., Seyedmahmoudian M., Stojcevski A., Horan B. Energy management system in microgrids: a comprehensive review. *Sustainability.* 2021. Vol. 13(19). Article no: 10492. 33 p. DOI: https://doi.org/10.3390/su131910492.

19. Uddin M., Mo H., Dong D., Elsawah S., Zhu J., Guerrero J.M. Microgrids: a review, outstanding issues and future trends. *Energy Strategy Reviews*. 2023. Vol. 49. Article no: 101127. 17 p. DOI: https://doi.org/10.1016/j.esr.2023.101127.

20. Battula A.R., Vuddanti S., Salkuti S.R. Review of energy management system approaches in microgrids. *Energies.* 2021. Vol. 14. Article no: 5459. 32 p. DOI: https://doi.org/10.3390/en14175459.

21. Boqtob O., El Moussaoui H., El Markhi H., Lamhamdi T. Microgrid energy system: A state-of-the-art review. *Journal of Electrical Systems*. 2019. Vol. 15. No 1. Pp. 53–67.

22. Yusof M.F.M., Ahmad A.Z. Enrollment issue, power energy management approach and structure of control of renewable energy microgrid: a review. *International journal of engineering technology and sciences (IJETS)*. 2019. Vol. 6 (2). Pp.12–27. DOI: https://doi.org/10.15282/ijets.v6i2.2742.

23. Zou H., Mao S., Wang Y., Zhang F., Chen X., Cheng L. A survey of energy management in interconnected multi-microgrids. *IEEE Access*. 2019. Vol. 7. Pp. 72158–72169. DOI: https://doi.org/10.1109/access.2019.2920008.

24. Leshchenko P., Zaporozhets A. Review of microgrid cluster architectures based on distributed energy resources. *Systemni doslidzhennia v enerhetytsi*. 2025. No 2. Vyp. 82. Pp. 13–28. DOI: https://doi.org/10.15407/srenergy2025.02.013. (Ukr)

25. Kucheriava I.M. Microgrids: current state and in perspective. *Pratsi Institutu elektrodynamiki NAN Ukrainy.* 2025. Vyp. 71. Pp. 28–43. DOI: https://doi.org/10.15407/publishing2025.71.028. (Ukr)

Надійшла 23.03.2026
Прийнята 31.03.2026