

## КОГЕНЕРАЦІЯ В МІКРОМЕРЕЖАХ

**І.М. Кучерява**, докт. техн. наук

Інститут електродинаміки НАН України,  
пр. Берестейський, 56, Київ, 03057, Україна  
e-mail: [rB.irinan@gmail.com](mailto:rB.irinan@gmail.com)

*Представлено сучасний стан розвитку найважливіших технологій у сфері розподіленої генерації, що стосуються процесів когенерації та тригенерації. Когенерація – надійне, енерго- та економічно ефективне, а також екологічне рішення в сумісному виробництві електричної і теплової енергії. Тригенерація дає змогу одночасно виробляти електро- і теплоенергію з додатковим холодом (охолодженням). Надано загальну характеристику когенераційних систем, їхні переваги та несприятливі фактори. Розглянуто різні типи систем когенерації – із верхнім, нижнім і комбінованим циклами роботи. Описано й порівняно характерні особливості сучасних когенераційних установок та систем контролю когенерації в мікромережах. Окреслено поточний стан і важливість розширення когенерації в Україні. Бібл. 26, рис. 5, табл. 4.*

**Ключові слова:** енергосистема, мікромережа, когенерація, тригенерація, електрична і тепла енергія, гібридна когенерація, відновлювані джерела енергії, технології когенерації, енергоефективність, екологічність.

**Вступ.** Зростання енергоспоживання і вартості палива, розвиток цифрових і комунікаційних технологій та зміна клімату обумовили необхідність вирішення проблеми енергоефективності та широкого розповсюдження мікромереж. Мікромережі можуть мати особливі переваги, наприклад, завдяки використанню системи когенерації, тобто виробництву як електричної, так і теплової енергії з одного джерела палива. Система когенерації має високу ефективність, менші витрати та безпечні викиди в навколишнє середовище порівняно з технологіями виробництва одного виду енергії [1, 2]. Когенерація використовується на електростанціях, промислових і комерційних підприємствах, в офісних будівлях та житлових комплексах.

Обсяг світового ринку когенерації в 2025 р. було оцінено в 30,14 млрд. доларів США, і за прогнозами очікується рівень 68,78 млрд. доларів до 2035 р. зі щорічним темпом зростання 8,6 % у період 2026–2035 рр. У 2026 р. прогнозується обсяг ринку когенераційного обладнання в 32,47 млрд. доларів США [3]. Постійне зростання ринку обумовлено високими вимогами до енергетичної й економічної ефективності, оскільки для промислових галузей і комунальних підприємств важливим є оптимізація використання палива та зниження експлуатаційних витрат. Крім того, перспективи пов'язуються з системами когенерації на основі відновлюваної енергії, що підтримуються біомасою, біогазом і водневими технологіями, які відповідають цілям стійкості та енергетичної безпеки.

Відповідно до [4] «комбіноване виробництво електричної та теплової енергії (когенерація) – спосіб одночасного виробництва електричної та теплової енергії в межах одного технологічного процесу». Тобто в одному ланцюгу поєднується виробництво і споживання теплової енергії. Відходи теплової енергії система когенерації використовує для створення тепла за допомогою розподілених енергетичних ресурсів, як-от паливні елементи та мікротурбіни [5].

У процесах когенерації вироблена тепла енергія зазвичай використовується на місці для виробництва тепла або пари в промислових процесах, кондиціонування приміщень та гарячого водопостачання. Однак, якщо когенераційна система виробляє більше корисної теплової енергії, ніж потрібно на місці, може здійснюватися її розподіл до сусідніх об'єктів, що сприяє покращенню економіки та енергоефективності. До того ж, оскільки когенерація передбачає виробництво двох форм енергії в одному процесі, вона може забезпечувати значну економію енергії порівняно з технологіями окремого виробництва електричної та теплової енергії.

*Метою цієї статті* є огляд технологій когенерації, що застосовуються в мікромережах, та створення інформаційного підґрунтя для просування аналогічних технологічних рішень і засобів в Україні.

**Загальна характеристика систем когенерації.** Системи когенерації можуть забезпечувати достатню кількість теплової енергії для промислового попиту та комерційних застосувань (опалення і в загальному випадку охолодження), а також для комунальної мережі, когенерація є конкурентоспроможною порівняно з технологіями окремого виробництва електричної та теплової енергії, оскільки відносно недорога та має певні переваги [5, 6]:

- автономне енергозабезпечення – виробництво електроенергії на місці, стійке до відключень у мережі;
- відсутність необхідності довгих ЛЕП та підстанцій;
- енергетична безпека, зокрема живлення критично важливих об'єктів у надзвичайних ситуаціях та зняття обмежень перевантаження наявної інфраструктури;
- надійність – зменшення ризику перебоїв у електропостачанні;
- ефективність – високий коефіцієнт корисної дії (ККД);
- економічні переваги – менші витрати на енергію, на енергоносії, нижча собівартість електричної і теплової енергії ніж тарифи у центральній мережі, можливість прогнозування ціни на енергію;
- екологічна безпека – зменшення забруднення навколишнього середовища.

Під екологічністю тут і далі розуміється зниження рівня шкідливих викидів у середовище при когенерації порівняно з роздільним виробництвом електричної і теплової енергії, без розгляду і порівняння різних видів палива, на якому працюють когенераційні установки (газ, нафтопаливо, дизельне паливо, гас, тверді відходи і т. ін.).

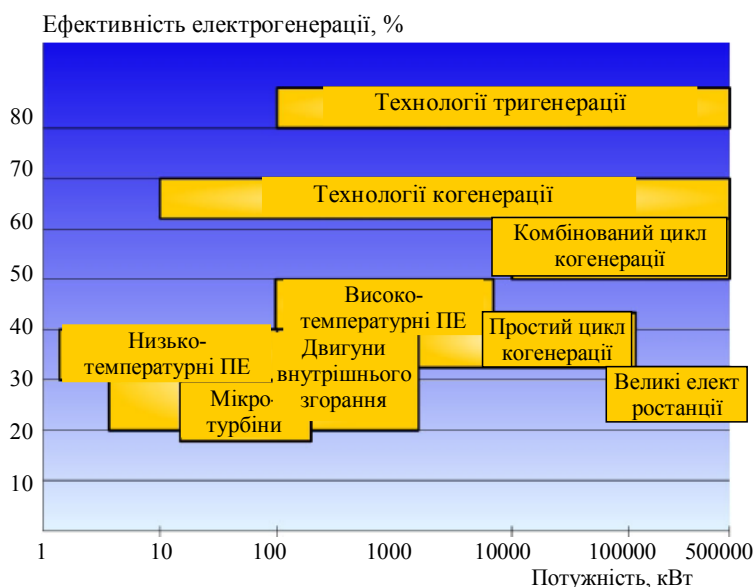
До несприятливих факторів когенерації можна віднести нижчезазначені:

- технічні складності системи когенерації, необхідність професійної експлуатації та належного технічного обслуговування;
- забезпечення окремих типів пального для деяких установок когенерації;
- наявність інфраструктури (обладнання для передачі електро- та теплоенергії: силових кабелів, місцевих ЛЕП, тепломереж);
- низька ефективність за малого навантаження (у разі низького виробництва електроенергії та тепла);
- достатньо висока вартість і складність установлення, особливо для об'єктів і підприємств з невеликим бюджетом;
- окупність вкладених коштів впродовж певного часу;
- коливання цін на ринкові енергетичні ресурси.

Порівняно з системою генерації одного виду енергії когенерація може досягати ККД до >80 %, що визначає ефективність її впровадження [7]. ККД системи когенерації залежить від типу первинного двигуна, його розміру та температури, за якої може бути використано рекупероване тепло.

Ефективність генерації електроенергії за нижчої теплоти згорання палива та найбільш прийнятний діапазон потужності для різних когенераційних технологій показано на рис. 1.

Відмінності когенерації від окремого виробництва електричної та теплової енергії показано в табл. 1 та на рис. 2.



**Рис. 1.** Ефективність та діапазон потужності для різних технологій когенерації [8].

Т Позначено ПЕ – паливні елементи

Таблиця 1

Показник	Роздільна генерація електро- і теплоенергії	Когенерація
ККД	30–40 %	до 90 %
Питомі витрати палива	високі	низькі
Вплив на довкілля	вище	нижче

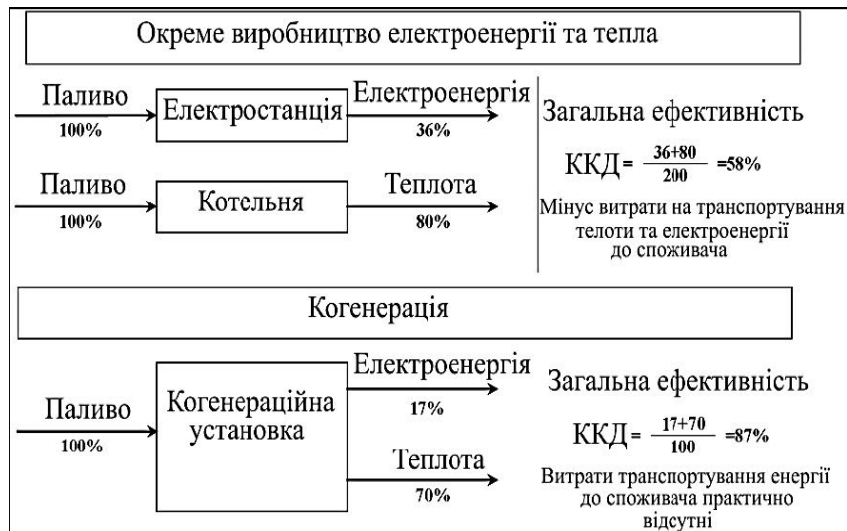


Рис. 2. Порівняння окремого виробництва електроенергії і тепла з когенерацією [9]

Зазвичай ККД енергоустановки визначається відношенням корисної енергії, одержуваної на виході, до підведеної енергії на вході. Відповідно до мікромереж ККД когенерації представляється як електричним, так і загальним ККД [7]:

$$\text{Електричний ККД} = \frac{\text{Електрична потужність, кВт}}{\text{Споживання палива, кВт}};$$

$$\text{Загальний ККД} = \frac{(\text{Корисна теплова потужність} + \text{Електрична потужність}), \text{кВт}}{\text{Споживання палива, кВт}}.$$

Як зазначається в [7], серед усіх систем мікромереж когенераційна система з комбінованим виробництвом тепла та електроенергії (теплоелектрогенерація) є найкращою для мережі.

Мікромережі розробляються з різною організацією джерел енергії, накопичувачів енергії, пристроїв силової електроніки та навантажень. Численні статті, наприклад [10–15], обговорюють підходи щодо вдосконалення системи когенерації. Сучасні дослідження охоплюють питання відносно її впровадження, проектування архітектури, ефективності, системи управління, оптимізації, техніко-економічного аналізу та характеристик, а також використання відновлюваних джерел енергії та впливу на довкілля [11, 13, 14].

Однчасне виробництво електричної та теплової енергії (тепла, холоду або їх обох) – суттєвий спосіб оптимізації енергоефективності. Важливо, що когенерація дає змогу економити енергію завдяки комбінованому виробництву.

При окремому виробництві електроенергії значна частина енергії, що міститься в паливі, втрачається. Із 100 % енергії палива лише ~33 % перетворюється в електричну енергію, решта втрачається через вихлопні гази, механічні втрати, а також електричні втрати при передачі та розподілі та ін. На відміну від цього система когенерації має ККД до 84 %, тобто ~84 % енергії, що міститься в паливі, використовується для електро- і теплогенерації (25–30 % електроенергії та 59–54 % теплової енергії) [8].

Зазначене можна проаналізувати на прикладі сучасних газових турбін, електричний ККД яких становить приблизно 42 %, та тих, що працюють у комбінованому циклі, з ККД до 55 %. У такому випадку із застосуванням технологій когенерації може бути досягнена загальна ефективність до 87 і 90 % відповідно [8].

Слід зауважити, що з терміном «когенерація» пов'язується не тільки сумісне виробництво електро- і теплоенергії, але й технології додаткового створення холоду (охолодження), що є основою тригенерації, а також корисний відпуск механічної енергії [4].

За останнє десятиліття когенерація набула значного поширення у світовому масштабі завдяки використанню газу, біомаси та енергетично цінних відходів. Розширення застосування когенерації передбачається завдяки новим технологіям багаторазового виробництва електроенергії, тепла, холоду (кондиціонування), регенерації води та хімічних продуктів [8].

Розрізняються малі когенераційні установки з установленою потужністю менше 1 МВт та мікро-когенераційні установки з максимальною потужністю менше 50 кВт [8].

Високоєфективна когенерація відповідає критерію виробництва із заощадженням первинної енергії принаймні на 10 % порівняно з еталонними значеннями для роздільного виробництва тепла та електроенергії, і виробництво на малих та мікрокогенераційних установках, що забезпечує заощадження первинної енергії, може вважатися високоєфективною когенерацією [16].

**Типи систем когенерації.** Розрізняються три типи систем: із прямим циклом роботи або з пріоритетом виробництва електроенергії (topping cycle), із використанням скидного технологічного тепла (bottoming cycle) та комбінованим циклом (combined cycle) [10].

Здебільшого когенерація працює у пріоритеті виробництва електроенергії, коли паливо спочатку використовується для виробництва електроенергії або механічної енергії на об'єкті, а частина відпрацьованого тепла йде далі для отримання корисної теплової енергії. Вироблена електроенергія може бути використана для опалення будівлі / приміщень або передана до електромережі. Далі забезпечується отримання технологічного тепла, гарячої води або опалення приміщень. У такому випадку установка зосереджена на виробництві електроенергії та продажу надлишкової електроенергії електроенергетичній компанії і зазвичай розрахована також на задоволення потреб об'єкта в теплі.

Когенераційні системи з використанням скидного технологічного тепла спочатку виробляють корисне тепло для виробничого процесу шляхом спалювання палива або будь-якої хімічної реакції, що генерує тепло, та рекуперують деяку частину відпрацьованого тепла для виробництва електроенергії. Такий цикл асоціюється з перетворенням відходів тепла в енергію і часто застосовується в переробних галузях, таких як скляна та сталеливарна промисловість, заснованих на високотемпературних процесах. Потім певна частина відведеного тепла рекуперується та використовується для виробництва електроенергії в мережі (наприклад, за допомогою парової турбіни).

У сучасних технологіях прямий цикл роботи системи і використання скидного технологічного тепла поєднуються та формують комбінований цикл для кращої ефективності (рис. 1).

Загальну схему когенерації в мікронережах із потоками передачі електро- та теплоенергії від блоків навантаження, генерації та зберігання енергії показано на рис. 3 [17].

**Характеристика технологій когенерації.** При виборі найбільш прийнятної технології когенераційного виробництва енергії керуються такими критеріями, як обсяг електричної енергії, що виробляється пристроєм, співвідношення між потребами в електричній та тепловій енергії, тиск виробленої пари і т. ін.

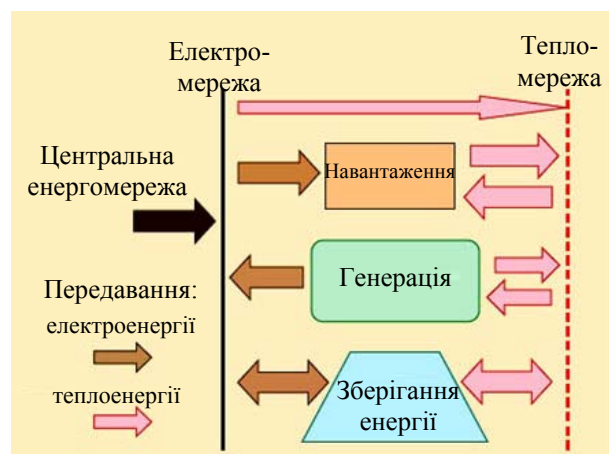


Рис. 3. Загальна схема передачі електро- та теплоенергії в мікронережах [17]

Основна ознака, за якою класифікують когенераційні установки (зарубіжний аналог – CHP – combined heat and power plant) – це тип первинного двигуна. На сьогодні більшість виробників пропонують варіанти двигунів: газопоршневий, газотурбінний, мікротурбінний.

*Газотурбінні установки* використовують газ, що спалюється в камері. Продукти згорання призводять до руху турбіни. Механічна енергія обертання перетворюється на електроенергію. Тепло, що виробляється від вихлопних газів, надходить до теплообмінника для виробництва гарячої води або пари. Такі когенераційні установки мають високу надійність, потужність від 250 кВт до 200 МВт, загальну ефективність до 87 % [8].

*Паротурбінні установки* працюють на парі. Пара високого тиску крутить турбіну, що виробляє електричну енергію. Відпрацьована пара використовується для опалення. Паротурбінні когенераційні установки можуть працювати на різноманітному паливі: природний газ, тверді відходи, вугілля, деревина та її відходи, сільськогосподарські субпродукти.

*Поршневі двигуни* працюють на газі або дизелі. Тепло від вихлопних газів і рідини, що охолоджує, йде на подальше використання. Розрізняються поршневі двигуни із запаленням від стиску (дизелі) та із запаленням від іскри, що мають діапазон електричної потужності і загального ККД – 0,2–20 МВт і 0,003–6 МВт та 65–90 % і 70–90 % відповідно.

*Паливні елементи* (ПЕ) представляють собою електрохімічний пристрій – електрохімічний генератор, що конвертує хімічну енергію реагентів – палива та оксиданта (окислювача) безпосередньо в електричну енергію шляхом електрохімічної реакції, в якій оксидантом є повітря або кисень, тобто забезпечується пряме перетворення хімічної енергії в електричну. Водневий ПЕ використовує водень як паливо та кисень (з повітря) як окислювач. Крім того, паливом можуть бути вуглеводні сполуки і спирти, а окислювачами – повітря, хлор, оксид хлору. ПЕ працюють, поки надходить паливо та окислювач, склад хімічної речовини в процесі роботи не змінюється, тому ПЕ не потрібно перезаряджати. Високотемпературні ПЕ працюють при температурі до 800–1000° С і мають більшу ефективність, ніж низькотемпературні, які функціонують до 100° С (рис. 1). ПЕ екологічні, успішно використовуються в мікромережах для комбінованих теплоелектричних застосувань.

*Двигуни Стирлінга* – це теплові машини, в яких газ або рідина рухається в замкнутому об'ємі та періодично нагрівається й охолоджується з метою вилучення енергії за зміни тиску. Двигуни працюють від будь-якого перепаду температури, від спалювання палива і від будь-якого джерела енергії. Можуть використовуватися такі гази, як водень і гелій, що мають прийнятні термодинамічні властивості, а також зовнішні теплові джерела – ядерне, викопне паливо, біомаса, геотермальні джерела [8].

*Мікротурбіни* – невеликі, компактні турбіни, в яких спалюється газоподібне або рідке паливо для роботи електрогенератора. За своєю конструкцією вони подібні до газових турбін. Вихідна потужність – до 330 кВт. Мікротурбіни розраховані на більшість промислових видів палива: природний газ, пропан, дизельне паливо, гас, супутній нафтовий газ, а також відновлювані види палива (біодизель, біогаз). У режимі когенерації може досягатися високий коефіцієнт використання палива – ~85 %. Характерні властивості мікротурбін наведено в табл. 2 [10].

Таблиця 2

Електрична потужність	33,030–330 кВт; з модульним пакетуванням до 1000 кВт
Термічні характеристики	Температура на виході 260–316° С, необхідна для потреб постачання як гарячої води, так і пари. Можливість резервування охолодженої води для подальших процесів охолодження та кондиціонування
Різнорманітність палива	Природний газ, рідке паливо (бензин, гас, дизельне паливо і т. ін.)
Надійність та строк служби	40000–80000 годин з модернізацією
Викиди	Невелике NO <sub>x</sub> згорання в разі роботи на природному газі
Модульність	Блоки можуть бути з'єднані паралельно за великих навантажень для забезпечення надійності
Габарити	Компактність – 0,7–0,85 м, невелика вага – 18–23 кг/кВт

*Газові мікротурбіни.* Діапазон потужності – від 25 до 300 кВт. Працюють на різноманітному паливі, не потребують особливого обслуговування, низькошумні, мало забруднюють середовище. Можливі чотири різні режими роботи: ізольовано від електричної мережі, з підключенням до мережі, подвійний режим з автоматичним переходом від ізольованої роботи до підключення до мережі, а також як згрупована система паралельно з мережею для постачання значної кількості енергії [8].

Основні характеристики технологій когенерації наведено в табл. 3, 4.

Таблиця 3

Параметри	Парова турбіна	Газова турбіна	Мікротурбіна	Паливні елементи
Вартість встановлення (\$/кВт)	670–1100	1200–3300	2500–4300	5000–6500
Вартість обслуговування (\$/кВт)	0,006 до 0,01	0,009 до 0,013	0,009–0,013	0,032–0,038
Потужність	500 кВт до 80 МВт	250 кВт – 200 МВт	20–250 кВт	0–83,6 МВт
Електричний ККД	5–40%	24–36%	22–28%	30–63%
Загальний ККД	~80%	66–71%	63–70%	55–80%
Часткове навантаження	так	слабко	так	добре
Час до ремонту (години)	>50000	25000–50000	40000–80000	32000–64000
Коефіцієнт готовності	72–99%	93–96%	98–99%	>95%
Час пуску	1 год. до 1 дня	10 хв. до 1 дня	60 с	3 год. до 2 днів
Питома потужність (кВт/м <sup>2</sup> )	> 100	20–500	5–70	5–20
Паливо	усі види палива	природний газ, синтетичний газ, нафтопаливо	природний газ, рідкі палива	водень, природний газ, пропан, метанол
Застосування теплової енергії	технологічний пар, централізоване теплостачання, гаряча вода, охолоджена вода	обігрів, гаряча вода, низько- та високо-енергетична пара	гаряча вода, охолодження та нагрів	гаряча вода, низько- та високо-енергетична пара

Таблиця 4

Технологія	Паливо	Електрична ефективність (%)	Загальна ефективність (%)
Парова турбіна	Будь-яке паливо	7–20	60–80
Газова турбіна	Газоподібне та рідке	25–42	65–87
Комбінований цикл	Газоподібне та рідке	35–55	73–90
Дизельні двигуни та двигуни внутрішнього згорання зі згоранням при постійному об'ємі (Otto engines)	Газоподібне та рідке	25–45	65–92
Мікротурбіни	Газоподібне та рідке	15–30	60–85
Паливні елементи	Газоподібне та рідке	~37–50	~85–90
Двигуни Стирлінга (Stirling engines)	Газоподібне та рідке	~40	~65–85

Слід відмітити також гібридну когенерацію – когенерацію у поєднанні з відновлюваними джерелами енергії, наприклад, одночасне використання паливних елементів, мікротур-

біни та фотоелектричної енергії, або паливних елементів і сонячної енергії, або сонячної, фотоелектричної енергії та мікрогенерації ін. [10]. У напрямку енергофактивності і рентабельності саме гібридна когенерація вважається оптимальним рішенням для мікромереж [10].

**Тригенерація.** Подальшим розвитком когенерації є тригенерація (рис. 4 [18]). У деяких когенераційних системах передбачена наявність охолоджувача абсорбційного типу, і

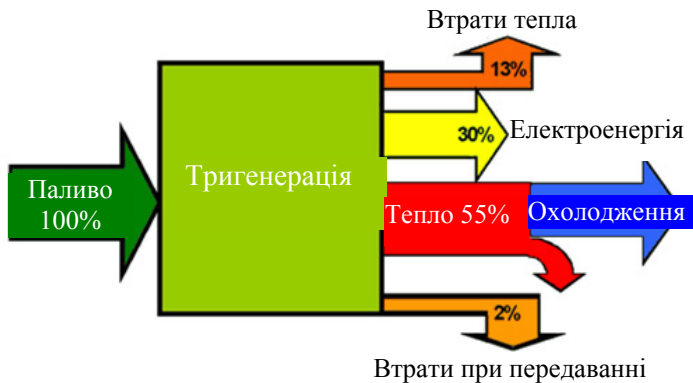


Рис. 4. Схема і характеристика тригенерації.

тепло, що виникає в процесі когенерації, часто використовується для створення холоду. Його можна направляти на системи кондиціонування повітря в приміщеннях, холодильні установки або застосувати в технологічних цілях, зокрема в технологіях сушіння повітрям. Такі системи називаються тригенераційними, оскільки вони виробляють електроенергію, тепло і холод одночасно.

Тригенерація відрізняється від когенерації тим, що теплова енергія, яка виробляється, використовується і

для нагрівання, і для охолодження.

Тригенерація має низку переваг, основні з яких такі:

- високоефективне виробництво електроенергії, тепла та охолодження на місці;
- теплова енергія двигуна використовується для виробництва пари або гарячої води на місці;
- зниження витрат на паливо та енергію;
- скорочення викидів парникових газів;
- відсутність шкідливих хімічних забруднювачів, оскільки вода використовується як холодоагент (охолоджуюче середовище).

**Контроль когенерації.** У випадку інтеграції когенераційної системи в інтелектуальні електроенергетичні системи необхідною є складна автоматизована система управління енергією відповідно до потреб споживачів в електроенергії та теплі. Сучасне когенераційне устаткування складається з високотехнологічного обладнання з великим набором технічних характеристик. Для управління роботою когенераційною установкою в автоматичному, напів-автоматичному або ручному режимі, використовуються різні електронні системи керування і діагностики з відповідним набором програмного забезпечення та візуалізацією технологічного процесу [10, табл. 7].

Управління і спеціальний контроль особливо важливі для промислових об'єктів із метою підтримки автоматизації і реалізації виробничих систем. Це передбачає запровадження алгоритмів програмованої логіки (PLC – programmable logic control), SCADA (supervisory control and data acquisition) програм, контролю зі зворотним зв'язком та комплексних режимів контролю.

У мікромережах системи контролю когенерації мають три рівня: первинний, вторинний і третинний [19]. Принципово ці рівні відповідають локальному, централізованому і децентралізованому контролю. Локальний (первинний) контроль передбачає управління пристроями силової електроніки і контроль частоти, напруги, струму, активної і реактивної потужності в мережі. На вторинному рівні здійснюється синхронізація усієї мережі та контроль за локальним рівнем. На третинному рівні реалізується загальний контроль потоків енергії, зокрема від когенерації, оптимальна робота мережі в різних режимах, контроль на глобальному рівні.

Децентралізований контроль застосовується у випадках, коли мікромережа має декілька незалежних власників зі своїми інтересами і вимогами до енергоресурсів, підтримки споживачів і експорту енергії до основної мережі, а також різними рішеннями і цілями на ринку, що потрібно окремо враховувати та синхронізувати. На відміну від цього, централізо-

ваний контроль когенерації передбачає єдину схему управління відповідно до чотирьох основних умов: 1) цін, що діють на ринку; 2) наявних генеруючих ресурсів в мікромережі; 3) навантажень, що обслуговуються; 4) потреби в електро- та теплоенергії з урахуванням її рівня (обсягу) і ціни. Централізований контроль менш витратний, його легше реалізувати і підтримувати, проте він є ефективним лише для невеликих мікромереж і не підходить для мікромереж із перспективою розширення і великою кількістю складових [10].

Застосування сучасних цифрових систем управління та автоматизації, нових алгоритмів контролю дає змогу підвищити ефективність роботи когенераційних установок.

**Стан когенерації в Україні.** Когенерація розглядається як один із ключових підходів до підвищення енергетичної безпеки України, особливо в умовах військових дій та постійних загроз руйнування енергетичної інфраструктури. Когенераційні установки активно застосовуються як джерела аварійної подачі тепла та / або електроенергії, що актуально в разі збоїв в електричних мережах.

Державна політика України в сфері використання когенераційних установок ґрунтується на засадах розвитку та збалансованого використання когенераційних установок у національній економіці [4]. Стимулювання збільшення когенераційних установок та загального обсягу когенераційної електроенергії проводиться завдяки фінансовій підтримці, податковим стимулам та посиленій регуляторній базі [4, 20].

Створено сприятливі умови для розвитку когенераційних технологій, зокрема впроваджено європейський механізм кваліфікації високоефективної когенерації, спрощено введення в експлуатацію газопоршневих когенераційних установок, звільнено від мита та ПДВ імпорт когенераційного обладнання та ін. [4, 20]

Загальний стан розвитку когенерації в 2024–2025 рр. відображено на рис. 5 [20]. Зокрема в I півріччі 2025 р. кваліфіковано 31 високоефективну когенераційну установку (КУ) із 390 МВт електричної та 1764 МВт теплової потужності [20].

Сучасні технології когенерації відкривають можливості для промисловості, всіх сфер економіки, суттєво знижуючи водночас витрати на енергію. Використання когенераційних установок дає змогу виробляти електричну і теплову енергію для власних потреб, а також постачати її в загальну мережу і продавати її на ринку. Деякі великі підприємства впроваджують такі установки задля незалежності від центральних мереж, тобто для забезпечення енергією незалежно і цілодобово. Прикладом такого рішення є практичний досвід ПАТ «Завод Південкабель», на якому створено промислову мікромережу з оптимальним використанням її елементів і зменшенням загальних витрат, які враховують вартість електроенергії від кожного джерела мікромережі, зокрема когенераційної установки з активною потужністю 1,5 МВт та максимальною реактивною потужністю 0,5 МВАр [21].

Високу ефективність у системах сумісного електро- і тепlopостачання України показують газопоршневі когенераційні установки, зокрема на базі двигунів Jenbacher з електричною потужністю від 294 до 1141 кВт та електричним ККД до 41 % [22, 23]. Слід відмітити, що когенерація є економічно доцільною, надає можливості кардинально зменшити витрати на електропостачання й опалення, проте має певні терміни окупності первинних інвестицій.

Тенденція інтеграції відновлюваних джерел енергії, таких як біомаса, біогаз, водень, сприяє розвитку когенерації та екологічно чистих енергетичних технологій. Використання біомаси як сировини дає змогу промисловості знижувати викиди вуглецю за умови стабільного енергопостачання. В Україні відомі когенераційні установки, що працюють на біомасі



Рис. 5. Стан когенерації в Україні

(лушпинні соняшника та щепі) [24]. Природні джерела енергії, серед яких торф та різноманітні тверді відходи, також покращують енергозбереження та енергоефективність.

Передові технології когенерації, як-от модульні конструкції та залучення відновлюваних видів палива, значно розширюють її можливості в мікромережах та енергетичних системах [25, 26].

**Висновки.** У статті надано огляд сучасних когенераційних технологічних систем, які запроваджуються в мікромережах, починаючи від переваг і недоліків таких систем, характеристик і особливостей їхньої роботи до систем контролю та управління в мікромережах.

Серед усіх технологій виробництва і використання енергії в мікромережах когенерація є найбільш ефективною. У когенераційних системах електрична і теплова енергії виробляються одночасно з одного джерела палива з ефективністю до 87 %. Показано, що порівняно з технологіями окремого виробництва енергії когенерація більш ефективна, надійна, економічно вигідна та екологічно безпечна.

Основними первинними двигунами в когенераційних системах є газові турбіни, парові турбіни, мікротурбіни та паливні елементи. Саме паливні елементи є найбільш перспективними, оскільки мають високий загальний ККД (55–80 %) та гнучкість у виборі палива (водень, природний газ, пропан, метанол).

Гібридні когенераційні системи будуються на основі поєднання звичайних технологій когенерації з відновлюваними джерелами енергії і являють собою оптимальне рішення для мікромереж.

Когенерація в застосуванні до мікромереж вимагає ускладненого управління роботою, для чого вбудовуються ієрархічні системи контролю одного з трьох типів: локальний, централізований і децентралізований контроль.

Когенерація розширюється в Україні, зокрема стосовно промислових мікромереж, та за умови воєнних дій і загроз руйнування енергооб'єктів в країні сприяє підтримці та балансу енергосистеми як в частині стабільної роботи, так і в напрямку енергетичної безпеки.

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

1. Державний стандарт України ДСТУ ISO 50001:2020. Системи енергетичного менеджменту. Вимоги та настанови щодо застосування.
2. Kusch S. Cogeneration (combined heat and power production) in Europe. *The 5th International Virtual Research Conference In Technical Disciplines*. November, 13–17. 2017. Pp. 52–55.
3. Cogeneration equipment Market size and forecast 2026–2035. August 12, 2025, Report ID 7388. URL: <https://www.researchnester.com/reports/cogeneration-equipment-market/7388>
4. Закон України Про комбіноване виробництво теплової та електричної енергії (когенерацію) та використання скидного енергопотенціалу. Набрання чинності 22.03.2024.
5. Handbook for cogeneration and combined cycle power plants: second edition. 2010. ASME Press.
6. Siirola J.J., Edgar T.F.. Process energy systems: control, economic, and sustainability objectives. *Computers & Chemical Engineering*. 20 December 2012, Vol 47. Pp. 134–144. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2012.06.019>
7. Nagi H, Neveux T, Le Y. Efficiency evaluation procedure of coal-fired power plants with CO<sub>2</sub> capture, cogeneration and hybridization. *Energy*. 2015. No. 91. Pp. 306–323. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.08.038> – <https://edf.hal.science/hal-01831812/file/2015-07-16%20Manuscript-Final.pdf>
8. Zamora I., San Martín J.I., Mazon A.J., San Martín J.J., Aperribay V., Arrieta J.M. Cogeneration in electrical microgrids. *Renewable Energy and Power Quality Journal*. 2006. Vol. No 1 (04). DOI: <https://doi.org/10.24084/repqj04.226>
9. Когенераційні технології в малій енергетиці: монографія В.А. Маляренко, О.Л. Шубенко, С.Ю. Андрєєв, М.Ю. Бабак, О.В. Сенецький. Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова, Ін-т проблем машинобуд. ім. А.М. Підгорного. Харків: ХНУМГ ім. О.М. Бекетова, 2018. 454 с.
10. Isa N.M., Chee Wei Tan C.W., Yatim A.H.M. A comprehensive review of cogeneration system in a microgrid: a perspective from architecture and operating system. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Elsevier, January 2018. Vol. 81. Part 2. Pp. 2236–2263. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.06.034>
11. Haeseldonckx D., Peeters L., Helsen L., D'haeseleer W. The impact of thermal storage on the operational behaviour of residential CHP facilities and the overall CO<sub>2</sub> emissions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Elsevier, August 2007. Vol. 11. Is. 6. Pp. 1227–1243. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2005.09.004>

12. Shams S., Ahmadian J., Ghorbanian M. J. Applying the CHP (combined heat and power) method on small-scale on-site power generation. *IEEE Conference on Clean Energy and Technology (CEAT)*, Langkawi, Malaysia. 18–20 November 2013. Pp. 303–306. DOI: <https://doi.org/10.1109/CEAT.2013.6775645>
13. Raj N.T., Iniyar S., Goic R. A review of renewable energy based cogeneration technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Elsevier. October 2011. Vol. 15. Is. 8. Pp. 3640–3648. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.06.003>
14. Gu W., Wu Z., Yuan X. Microgrid economic optimal operation of the combined heat and power system with renewable energy. *IEEE Power & Energy Society General Meeting*, Minneapolis, MN, USA. 25–29 July 2010. 6 p. DOI: <https://doi.org/10.1109/PES.2010.5590140>
15. Lee H., Bush J., Hwang Y., Radermacher R.. Modeling of micro-CHP (combined heat and power) unit and evaluation of system performance in building application in United States. *Energy*. September 2013. Vol. 58. Pp. 364–375. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.05.015>
16. Директива Європейського парламенту і Ради 2012/27/ЄС від 25 жовтня 2012 року про енергоефективність. URL: [https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/en/984\\_017-12/ed20121025#n56](https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/en/984_017-12/ed20121025#n56)
17. Katiraei F., Iravani R., Hatziargyriou N., Dimeas A. Microgrid management. Controls and operation of microgrids. *IEEE Power & Energy Magazine*. 2008. Pp. 54–65.
18. Zafar S. Trigeneration systems: working principle and benefits. *Energy, Industry*. July 18, 2025. URL: <https://www.ecomena.org/trigeneration-systems/>
19. Кучерява І.М. Мікромережі: сучасний стан і перспективи розвитку. *Праці Інституту електродинаміки НАН України*. 2025. Вип. 71. С. 28–43.
20. Високоєфективна когенерація: енергетичний хаб для громад і промисловості. 08 жовтня 2025. URL: <https://saee.gov.ua/news/vysokoefektyvna-koheneratsiia-enerhetychnyi-khab-dlia-hromad-i-promyslovosti>
21. Щерба А.А., Подольцев О.Д., Білянin Р.В., Антоненко Т.Ю., Дадажанов Ю.В. Моделювання та аналіз довготривалих 24-годинних процесів змінення потоків електричної енергії в мікромережі промислового підприємства. *Технічна електродинаміка*. 2026. № 1. С. 62–71. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2026.01.062>
22. Степанов Д.В., Резидент Н.В. Ефективність газопоршневих когенераційних установок в системах централізованого тепlopостачання. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2023. № 2. С. 36–41. DOI: <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2023-167-2-36-41>
23. Газопоршневые электростанции GE Jenbacher. URL <http://www.cogeneration.ru/jenbacher>
24. Сільськогосподарські відходи і політика когенерації: досвід Європи та України. ТрансЕнергоКонсалтинг, 2012, 12 с. URL: <https://uabio.org/wp-content/uploads/2012/11/ifc-workshop-golikova.pdf>
25. Цілі сталого розвитку: Україна. Національна Доповідь 2017. URL: <https://www.kmu.gov.ua/storage/app/sites/1/natsionalna-dopovid-csr-Ukrainy.pdf>
26. Аналіз впровадження мікромереж в Україні. Команда підтримки відновлення і реформ при Міністерстві енергетики України. Аналітична робота. Київ, жовтень 2025, 70 с. URL: [https://www.mev.gov.ua/sites/default/files/2025-10/mikromerezhi-ua\\_0.pdf](https://www.mev.gov.ua/sites/default/files/2025-10/mikromerezhi-ua_0.pdf)

## COGENERATION IN MICROGRIDS

I.M. Kucheriava

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

Beresteiskiy ave., 56, Kyiv, Ukraine

e-mail: [rB.irinan@gmail.com](mailto:rB.irinan@gmail.com)

*This paper presents the current state in development of the most important technologies in the field of distributed generation, related to the processes of cogeneration and trigeneration. Cogeneration is a reliable, energy- and cost-effective and ecological solution in the combined production of electric and thermal energy. Trigeneration allows for the simultaneous production of electricity and heat with additional cold (cooling). The general characteristic of cogeneration systems, their advantages and negative factors are given. The different types of cogeneration systems (with the topping, bottoming and combined cycles of operation) are considered. The features of modern cogeneration plants and cogeneration control systems in microgrids are described and compared. The current state and importance of cogeneration in Ukraine are outlined. Ref. 26, fig. 5, tables 4.*

**Keywords:** power system, microgrid, cogeneration, trigeneration, electric and thermal energy, hybrid cogeneration, renewable energy sources, cogeneration technologies, energy efficiency, decarbonization.

1. State Standard of Ukraine DSTU ISO 50001:2020. Energy management systems. Requirements and guidelines for application. (Ukr)
2. Kusch S. Cogeneration (combined heat and power production) in Europe. *The 5th International Virtual Research Conference In Technical Disciplines*. November, 13–17. 2017. Pp. 52–55.
3. Cogeneration equipment Market size and forecast 2026–2035. August 12, 2025, Report ID 7388. URL: <https://www.researchnester.com/reports/cogeneration-equipment-market/7388>
4. Law of Ukraine On combined heat and power generation (cogeneration) and use of waste energy potential. Valid from 22.03.2024. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2955-20#Text> (Ukr)

5. Handbook for cogeneration and combined cycle power plants: second edition. 2010. ASME Press. URL: <https://ru.scribd.com/document/703790480/859537-fm>
6. Siirola J.J., Edgar T.F. Process energy systems: control, economic, and sustainability objectives. *Computers & Chemical Engineering*, 20 December 2012. Vol. 47. Pp. 134–144. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2012.06.019>
7. Hagi H, Neveux T, Le Y. Efficiency evaluation procedure of coal- fi red power plants with CO<sub>2</sub> capture, cogeneration and hybridization. *Energy*. 2015. No 91. Pp. 306–323. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.08.038> – <https://edf.hal.science/hal-01831812/file/2015-07-16%20Manuscript-Final.pdf>
8. Zamora I., San Martín J.I., Mazon A.J., San Martín J.J., Aperribay V., Arrieta J.M. Cogeneration in electrical microgrids. *Renewable Energy and Power Quality Journal*. 2006. Vol. 1 (04). DOI: <https://doi.org/10.24084/repqj04.226>
9. Cogeneration technologies in small power generation: monograph. V.A. Malyarenko, O.L. Shubenko, S.Yu. Andreev, M.Yu. Babak, O.V. Senetsky. Kharkiv. National University of Urban Economics named after O. M. Beketov. Institute of Problems of Mechanical Engineering named after A.M. Pidgorny. Kharkiv: KhNUMG named after O.M. Beketov. 2018. 454 p. (Ukr)
10. Isa N.M., Chee Wei Tan C.W., Yatim A.H.M. A comprehensive review of cogeneration system in a microgrid: a perspective from architecture and operating system. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Elsevier. January 2018. Vol. 81. Part 2. Pp. 2236–2263. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.06.034>
11. Haeseldonckx D., Peeters L., Helsen L., D’haeseleer W. The impact of thermal storage on the operational behaviour of residential CHP facilities and the overall CO<sub>2</sub> emissions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Elsevier. August 2007. Vol. 11. Is. 6. Pp. 1227–1243. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2005.09.004>
12. Shams S., Ahmadian J., Ghorbanian M. J. Applying the CHP (combined heat and power) method on small-scale on-site power generation. *IEEE Conference on Clean Energy and Technology (CEAT)*, Langkawi, Malaysia. 18–20 November 2013. Pp. 303–306. DOI: <https://doi.org/10.1109/CEAT.2013.6775645>
13. Raj N.T., Iniyas S., Goic R. A review of renewable energy based cogeneration technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Elsevier. October 2011. Vol. 15, Is. 8. Pp. 3640–3648. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.06.003>
14. Gu W., Wu Z., Yuan X. Microgrid economic optimal operation of the combined heat and power system with renewable energy. *IEEE Power & Energy Society General Meeting*, Minneapolis, MN, USA. 25–29 July 2010. 6 p. DOI: <https://doi.org/10.1109/PES.2010.5590140>
15. Lee H., Bush J., Hwang Y., Radermacher R.. Modeling of micro-CHP (combined heat and power) unit and evaluation of system performance in building application in United States. *Energy*. September 2013. Vol. 58. Pp. 364–375. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.05.015>
16. Directive of the European Parliament and of the Council 2012/27/EU of 25 October, 2012 on energy efficiency. URL: [https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/en/984\\_017-12/ed20121025#n56](https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/en/984_017-12/ed20121025#n56) (Ukr)
17. Katiraei F., Iravani R., Hatziargyriou N., Dimeas A. Microgrid management. Controls and operation of microgrids. *IEEE Power & Energy Magazine*. 2008. Pp. 54–65. URL: 10.1109/MPE.2008.918702
18. Zafar S. Trigenation systems: working principle and benefits. *Energy, Industry*. July 18, 2025. URL: <https://www.ecomena.org/trigenation-systems/>
19. Kucheriava I.M. Microgrids: current state and in perspective. *Pratsi Institutu elektrodynamiki NAN Ukrainy*. 2025. Is. 71. Pp. 28–43. (Ukr)
20. High-efficiency cogeneration: an energy hub for communities and industry. October 08, 2025. URL: <https://saee.gov.ua/news/vysokoefektyvna-koheneratsiia-enerhetychnyi-khab-dlia-hromad-i-promyslovosti> (Ukr)
21. Shcherba A.A., Podoltsev O.D., Belyanin R.V., Antonets T.Yu., Dadazhanov Yu.V. Modeling and analysis of long-term 24-hour processes of changes in electrical energy flows in the microgrid of an industrial enterprise. *Tekhnichna Elektrodynamika*, 2026. No 1. Pp. 62–71. (Ukr) DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2026.01.062>
22. Stepanov D.V., Rezydent N.V. Efficiency of gas-piston cogeneration facilities in the systems of centralized heat supply. *Visnyk Vinnytskogo polytekhnicheskogo institutu*. 2023. No. 2. Pp. 36–41. (Ukr) DOI: <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2023-167-2-36-41>
23. GE Jenbacher gas piston power plants. URL: <http://www.cogeneration.ru/jenbacher> (Rus)
24. Agricultural waste and cogeneration policy: experience of Europe and Ukraine. TransEnergoConsulting. 2012. 12 p. URL: <https://uabio.org/wp-content/uploads/2012/11/ifc-workshop-golikova.pdf> (Ukr)
25. Sustainable Development Goals: Ukraine. National Report. 2017. URL: <https://www.kmu.gov.ua/storage/app/sites/1/natsionalna-dopovid-csr-Ukrainy.pdf> (Ukr)
26. Analysis of the application of microgrids in Ukraine. Recovery and Reform Support Team at the Ministry of Energy of Ukraine. Analytical work. Kyiv, October 2025. 70 p. URL: [https://www.mev.gov.ua/sites/default/files/2025-10/mikromerezhi-ua\\_0.pdf](https://www.mev.gov.ua/sites/default/files/2025-10/mikromerezhi-ua_0.pdf) (Ukr)

Надійшла: 11.02.2026

Прийнята: 05.03.2026

Submitted: 11.02.2026

Accepted: 05.03.2026