

УДК 536.7

ГАЗОПОРШНЕВІ ДВИГУНИ В РОЗПОДІЛЕНІЙ ЕНЕРГЕТИЦІ УКРАЇНИ

Халатов А.А.¹, Кобзар С.Г.², Борисов І.І.³, Фіалко Н.М.⁴¹академік НАН України, д-р техн. наук, Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Капніст, 2а, м. Київ, 03057, Україна, професор, <https://orcid.org/0000-0002-7659-4234>²канд. техн. наук, Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Капніст, 2а, м. Київ, 03057, Україна, пров. наук. співр., старший науковий співробітник, <https://orcid.org/0000-0002-8615-4400>, e-mail: sergiykobzar@gmail.com³канд. техн. наук, Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Капніст, 2а, м. Київ, 03057, Україна, пров. наук. співр., старший науковий співробітник, <https://orcid.org/0000-0001-7696-3901>, e-mail: borysov10@gmail.com⁴член-кореспондент НАН України, д-р техн. наук, Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Капніст, 2а, м. Київ, 03057, Україна, професор, orcid.org/0000-0003-0116-7673, e-mail: nmfialko@ukr.net<https://doi.org/10.31472/ttpe.4.2025.9>

У статті розглянуто сучасний стан застосування газопоршневих електростанцій для побудови розподіленої генерації України. Проаналізовано основні типи та термодинамічні цикли двигунів, проведено порівняння з газотурбінними установками. Було встановлено, що газова турбіна є більш ефективним рішенням для співвідношення електричної потужності до теплової менше 0,8. При співвідношенні електричної потужності до теплової $> \sim 0,8$, системи з газовим двигуном, як правило, досягають підвищеної загальної ефективності, а також значно більшої економії первинної енергії. Розглянуто економічні аспекти впровадження когенераційних установок з газопоршневим двигуном.

The article discusses the current state of application of gas reciprocating power plants for the construction of distributed energy generation in Ukraine. The main types and thermodynamic cycles of engines are analysed, and a comparison with gas turbine installations was made. It was found that a gas turbine is a more efficient solution for a ratio of electrical power to thermal power of less than 0.8. When the ratio of electrical power to thermal power is $> \sim 0.8$, gas engine systems generally achieve higher overall efficiency and significantly greater primary energy savings. The economic aspects of implementing cogeneration plants with gas reciprocating engines are considered.

Бібл. 29, рис.4.

Ключові слова: розподілена генерація, газопоршневий двигун, модульна електростанція, режими експлуатації.

Скорочення

КГУ - когенераційна установка;

ККД – коефіцієнт корисної дії;

ЛЕП – лінія електропередачі.

Вступ

Когенераційні установки знаходять широке застосування у виробничому секторі, комунальному господарстві та інших галузях, забезпечуючи споживачів електроенергією та теплотою при економічній витраті палива та низьких викидах парникових газів. В разі віддаленого знаходження поселень від ліній електропостачання встановлення КГУ дозволяє забезпечити комфортний рівень життя населенню у короткий термін без прокладання ЛЕП. Установки когенерації доцільно використовувати в торгових центрах, офісних будівлях, готелях та лікарнях для забезпечення надійного та економічного постачання електроенергією, теплом взимку та холодом влітку, що є критичним для забезпечення комфорту та безпеки. У сільському господарстві когенераційні установки використовуються для обігріву теплиць, забезпечення енергією ферм та інших аграрних об'єктів.

Війна в Україні поставила нові виклики перед енергетикою країни. Об'єднана енергетична система України будувалася як централізована з великими вузловими електростанціями та системою ліній передачі високих напруг. Така конфігурація є вразливою до ворожих атак. Адже практично неможливо забезпечити захист великих електростанцій (особливо, ТЕС і ТЕЦ), і руйнування цих об'єктів призводить до знеструмлення великої кількості споживачів. Внаслідок ворожих обстрілів постраждали теплова та гідро- генерації, які своєю роботою забезпечували стабільність енергосистеми. За оцінками НЕК «Укренерго», для відновлення енергетики України необхідно побудувати 15 ГВт нових генеруючих потужностей, з яких 11,6 ГВт припадає на децентралізовану генерацію (3,3 ГВт - маневрену, 4,5 – вітрову та 3,8 – сонячну) [1].

У 2025 році в Україні почала активно працювати нова модель взаємодії бізнесу з енергетичними інвесторами. Вона дуже проста, але надзвичайно ефективна. Інвестор вкладає кошти у когенераційне обладнання, яке коштує мільйони євро. Підприємство нічого не купує — воно просто отримує доступ до стабільної електроенергії, купуючи її у інвестора за заздалегідь узгодженим тарифом. Це дозволяє українським компаніям уникнути гігантських капітальних витрат, отримати дешевше й надійніше енергопостачання, а інвесторам — стабільний прибуток на довгі роки [2]

Прикладом може слугувати енергетичний проект Power One. У рамках цього проекту залучається фінансування та будується розподілена генерація, яка складається з батарей та газопоршневих станцій – балансує потужностей, які найбільше потрібні системі. [3].

Мета цієї статті – розглянути технічні та економічні аспекти побудови розподіленої генерації на базі газопоршневих двигунів для забезпечення стабільного енергозабезпечення України.

Термодинамічні цикли поршневих двигунів. Робочими елементами типового поршневого двигуна є циліндр II з поршнем III (рис. 1), з'єднаним через кривошипно-шатунний механізм і колінчастий вал зі споживачем роботи (гвинтом, колесами, генератором та ін.). У циліндрі є два отвори з клапанами I для впуску робочого тіла (повітря або паливноповітряної суміші) і випуску продуктів згоряння в кінці циклу. Найбільшого поширення набули два типи поршневих двигунів - з примусовим займанням паливноповітряної суміші (цикл Отто, рис. 1) та зі займанням за рахунок стиснення повітря (цикл Дизеля) [4,5].

Цикл Отто, зображений на рис. 1 в $p-v$ і $T-s$ координатах, складається з двох адіабат і двох ізохор. При дослідженні циклу Отто в якості вихідних задають ступінь стиснення ϵ в адіабатному процесі 1-2 і ступінь підвищення тиску λ в процесі підведення теплоти 2-3. Визначимо підведену q_1 і відведену q_2 теплоту, термічний ККД η_t і роботу циклу l_u . Для ізохорних процесів 2-3 і 4-1 підведена і відведена теплота визначається наступними рівняннями:

$$q_1 = c_v(T_3 - T_2) = c_v T_1 \frac{T_2}{T_1} \left(\frac{T_3}{T_2} - 1 \right), \tag{1}$$

$$q_2 = c_v(T_4 - T_1) = c_v T_1 \left(\frac{T_4}{T_1} - 1 \right). \tag{2}$$

Тут відповідно до адіабатних процесів:

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^{k-1} = \epsilon^{k-1}, \quad \frac{T_3}{T_2} = \frac{p_3}{p_2} = \lambda \tag{3}$$

Відношення температур $\frac{T_1}{T_4}$ визначимо з умови $\Delta S_{2-3} = \Delta S_{4-1} = \Delta S$ (рис. 1.1). Тоді:

$$\Delta s = c_v \ln \frac{T_4}{T_1} = c_v \ln \frac{T_3}{T_2}$$

звідки:

$$\frac{T_4}{T_1} = \frac{T_3}{T_2} = \lambda. \tag{4}$$

Підставивши (3) і (4) в (1) і (2), матимемо:

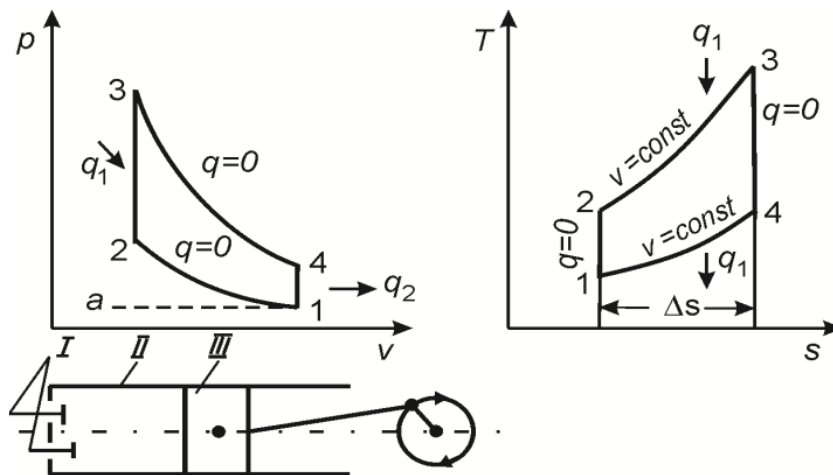


Рис. 1. Цикл Отто в $p-v$ і $T-s$ діаграмах
 Fig. 1. Otto cycle in $p-v$ and $T-s$ diagrams

$$q_1 = c_v T_1 \varepsilon^{k-1} (\lambda - 1), \quad (5)$$

$$q_2 = c_v T_1 (\lambda - 1). \quad (6)$$

Використовуючи вирази для q_1 і q_2 , отримаємо формули для термічного ККД (7) і питомої роботи циклу (1.8):

$$\eta_t = 1 - \frac{q_2}{q_1} = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}} \quad (7)$$

$$l_{ц} = q_1 - q_2 = c_v T_1 (\varepsilon^{k-1} - 1) (\lambda - 1) \quad (8)$$

В реальних двигунах ККД залежить від багатьох факторів, включаючи втрати тиску на клапанах і середню швидкість поршня, що впливає на насосні втрати. Збільшення довжини ходу поршня у двигуні Отто дійсно вимагає зниження числа обертів колінчастого валу для підтримання постійної середньої швидкості поршня, що, своєю чергою, може призвести до зниження вихідної потужності двигуна. [6]. Однак є й переваги такого підходу. Наприклад, збільшення довжини ходу поршня може призвести до більшого крутного моменту на низьких обертах, що може покращити роботу двигуна в певних умовах. До того ж, з розвитком сучасних технологій можна використовувати матеріали й конструкції, що мінімізують втрати тиску і насосні втрати, тим самим підвищуючи загальний ККД двигуна.

Тепловий баланс КГУ

Розподіл теплоти, що виділяється під час згоряння палива в двигуні, на окремі складові (корисно використовувану теплоту та різні види теплових втрат) називають

тепловим балансом. Тепловий баланс двигуна дозволяє оцінити досконалість тепловикористання, теплові втрати та можливість їх зменшення, а також ефективність роботи двигуна при різному навантаженні. Теплота палива, введеного в двигун, лише на 25–45% використовується на корисну роботу, решта ж її частина витрачається на охолодження, йде з відпрацьованими газами тощо. Тепловий баланс також дозволяє визначити кількість води (холодоагенту), необхідної для охолодження двигуна. У більшості випадків тепловий баланс визначають експериментально, виражаючи його складові в абсолютних одиницях теплоти за 1 годину роботи двигуна або за час витрат 1 м³ палива.

Сучасні двигуни внутрішнього згоряння на газовому паливі, що працюють на збідненій суміші, є багатими джерелами тепла. Значну частину тепла, яке інакше було б втрачено, можна використовувати для виробничих цілей залежно від потреб користувача у теплі. Кожне джерело теплової енергії має свій потенціал, і від цього залежить різновид технологічного процесу де ця теплота може бути застосована [8].

Вихлопні гази двигуна мають найвищий потенціал. Типова температура вихлопних газів становить близько 460°C. Вихлопне тепло може генерувати пар середнього тиску для таких цілей, як підігрів живильної води для котла, і пар низького тиску для таких процесів, як стерилізація, пастеризація, обігрів приміщень, підігрів баків, зволоження та інші. Крім того, додаткове згоряння з природним газом може підвищити температури вихлопних газів і тепловіддачу, що дозволить виробляти більше пари з більшим об'ємом і тиском, відкриваючи ще більше можливостей.

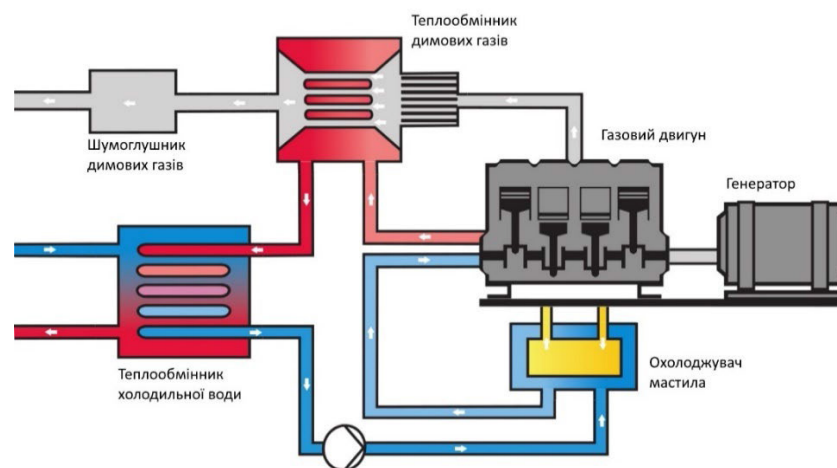


Рис. 2. Принципова схема КГУ [7]

Fig. 2. Schematic diagram of the CHP [7]

Тепло також можна відібрати від холодоагенту, який охолоджує сорочку двигуна, для отримання теплої або гарячої води при температурах до 99°C. Дана теплова енергія може бути використана для обігріву приміщень і широкого спектру технологічних процесів. Тепло нижчої якості доступне з охолоджувача мастила (якщо він не входить до системи охолодження сорочки) та з другої ступені охолоджувача (за наявності) можна використовувати для додаткового низькопотенційного гарячого водопостачання.

Модульні газопоршневі електростанції

Когенераційні системи на базі газових двигунів дійсно вражають своїми можливостями щодо економії енергії та зниження рівня шуму і вібрацій. Їх головною перевагою є висока ефективність перетворення енергії: порівняно з роздільними системами генерації електроенергії та тепла, когенераційні системи можуть заощадити до 40 % первинної енергії.

Встановлення таких систем у безпосередній близькості від споживачів дозволяє значно зменшити втрати енергії під час передачі та розподілу. Крім того, завдяки низьким рівням шуму і вібрацій такі станції можуть бути розташовані поруч із кінцевими користувачами, що робить їх зручним рішенням для міських і промислових районів.

Модульна конструкція визначає відносно невисокі капіталовкладення у діапазоні потужності від 1 до 60 МВт. Періодичність ремонтів та їх трудомісткість залежать від типу двигуна (високо- або середньооборотний двигун, кількість циліндрів тощо) і виду використуваного палива.

У цілому двигуни призначені для постійної роботи протягом 25–30 років з розрахунку 8 тис. годин на рік за умови дотримання регламентних робіт і правильного технічного обслуговування.

Для отримання максимальної гнучкості електростанція може бути обладнана навіть одним додатковим (резервним) модулем, який запускається для задоволення пікових навантажень. Цей агрегат буде замінюватися іншим з числа встановлених для того, щоб наробіток годин розподілявся між двигунами рівномірно.

Будівництво таких блочно-модульних станцій має кілька очевидних переваг:

- Заводське складання: Збірка модулів на заводі робить цю операцію акуратнішою і простішою, монтажні роботи зводяться до мінімуму, а прийнятно-здавальні випробування значно полегшуються.
- Скорочення часу проекту: Загальний час виконання проекту скорочується.
- Уніфікація модулів: Уніфікація модулів за функціями та змістом дає подальше здешевлення станції загалом.
- Поетапна поставка потужностей: Постачання потужностей помодульно дозволяє замовнику нарощувати потужності поступово або у разі необхідності, або за наявності вільних коштів.

На рис. 3 наведена типова будова газопоршневої КГУ у контейнерному виконанні.

Впровадження модульних електрогенеруючих потужностей стала актуальністю для України під час війни.



Рис 3. Типова будова газопоршневої КГУ у контейнерному виконанні [9]

Fig. 3. Typical structure of a gas reciprocating engine CHP in a container design [9]

Для компенсації втрачених генеруючих потужностей на 31 грудня 2024 року, було введено в експлуатацію сумарну потужність генеруючих установок розподіленої газової генерації у розмірі 967 МВт. За даними операторів мережі, частина генеруючих об'єктів підключена до технологічних електричних мереж споживача та використовуються для покриття власних потреб підприємств і громад. Це, безумовно, позитивно впливає на безпеку постачання електричної енергії цих споживачів та, як наслідок, зниження загального рівня споживання в ОЕС України. Завдяки цьому зменшується навантаження в пікові години та пом'якшуються наслідки застосування заходів із обмеження споживання у дефіцитні періоди функціонування національної енергосистеми [10].

Основні виробники газопоршневих двигунів для когенераційних установок

До них слід віднести: Jenbacher, MWM, Caterpillar (CAT), Cummins, Liebherr, Wärtsilä, Everllence (бувша MAN Energy Solutions), Rolls-Royce (MTU), Doosan.

Jenbacher, відомий виробник газопоршневих двигунів, пропонує широкий асортимент моделей для різних потреб потужністю до 10 МВт. Ці двигуни відзначаються високою ефективністю, надійністю та можливістю працювати на різних видах палива, включаючи природний газ, біогаз та інші альтернативні джерела [11].

MWM пропонує широкий асортимент газопоршневих двигунів, які відзначаються високою ефективністю та надійністю. MWM є підрозділом Caterpillar Energy Solutions. Основні серії двигунів мають потужність від 400 до 4500 кВт. [12]. Двигуни цього виробника можуть працювати на різних видах газу, таких як природний газ, біогаз, шахтний газ та інші. Вони також підтримують когенераційні системи, що дозволяє одночасно виробляти електроенергію та тепло.

Діапазон потужності для газопоршневих двигунів Caterpillar (CAT), залежно від серії [13] покриває діапазон потужностей від 500 до 2000 кВт.

Компанія Cummins пропонує широкий асортимент газопоршневих двигунів, які відзначаються високою надійністю та ефективністю. Двигуни Cummins можуть працювати на дизельному, газовому та альтернативному (гідратована рослинна олія) паливах. Основні серії двигунів включають двигуни потужністю від 50 до 2000 кВт [14].

Liebherr [15] пропонує кілька серій газових двигунів, які відзначаються високою ефективністю та надійністю. Основні моделі покривають діапазон потужностей від 164 до 1070 кВт. Двигуни цього виробника розроблені для роботи на природному газі та біогазі, забезпечую-

чи високу механічну ефективність (до 43.9%). Liebherr також пропонує повністю укомплектовані двигуни для зручності інтеграції в когенераційні системи.

Wärtsilä [16] пропонує широкий асортимент газових двигунів потужністю до 18 МВт, які відзначаються високою ефективністю та гнучкістю, які можуть працювати на природному газі, біогазі та навіть синтетичному метані, забезпечуючи високу продуктивність і низькі викиди.

Газопоршнєві двигуни Everllence (MAN) [17] відзначаються високою ефективністю, надійністю та низькими викидами. Модельний ряд двигунів покриває діапазон потужностей від 37 до 735 кВт. Двигуни можуть працювати на природному газі, біогазі, зваляченому газі та інших видах палива. Вони забезпечують високу енергоефективність (загальна ефективність КГУ понад 90%) і довгий термін служби.

Газопоршнєві двигуни Rolls-Royce (MTU) [18] відомі своєю високою ефективністю, надійністю та екологічністю. Діапазон потужностей – від 250 кВт до 10 МВт. Двигуни забезпечують ефективність по виробництву електроенергії до 42.6% і можуть працювати на природному газі та біогазі. Вони також готові до переходу на водень. Ці двигуни ідеально підходять для когенераційних установок, забезпечуючи одночасне виробництво електроенергії та тепла.

Компанія Doosan [19] пропонує газопоршнєві двигуни потужністю від 290 до 500 кВт. Двигун має турбонаддув і водяне охолодження, що забезпечує стабільну роботу, можуть працювати на природному газі та біогазі, забезпечуючи оптимальну продуктивність для когенераційних систем.

Українське підприємство «Первомайськдизельмаш» [20] спеціалізується на випуску середньооборотних газопоршневих двигунів електричною потужністю 315–750 кВт із виробництвом теплової енергії до 1065 кВт/год. Українське підприємство «Завод ім. В.О. Малишева» (м. Харків) [20] спеціалізується на випуску газових двигунів та газодизелів електричною потужністю 1,0–2,08 МВт (ККД = 39–40 %), які використовують природний газ та низькокалорійні гази з об'ємним вмістом метану понад 30 %.

Режими експлуатації КГУ з електричною та тепловою мережами

За типом підключення до електричної мережі можна визначити паралельну роботу з зовнішньою мережею та ізольовану роботу, коли вироблена електроенергія споживається користувачами локальної мережі.

Для роботи когенераційної системи в паралельному режимі існують важливі особливості, які повинні бути

враховані при проектуванні як когенераційної установи, так і електричної системи об'єкту:

- КГУ повинна бути оснащена синхронізуючим обладнанням, щоб фазування електроенергії від генератора можна було узгодити з фазуванням місцевої електромережі. Підключення генератора без синхронізації може призвести до серйозних і дорогих пошкоджень електрообладнання, а також до тривалого відключення електроенергії.

- Електрична система об'єкта повинна бути обладнана відповідним захисним обладнанням, щоб генератор автоматично і миттєво відключався в разі виникнення будь-яких проблем з електричною системою. Таке захисне обладнання зазвичай контролює такі умови, як напруга, струм і положення автоматичних вимикачів і автоматичних вимикачів.

- Електрообладнання на об'єкті, включаючи когенераційну установку, не повинно викликати надмірно високі пікові струми в разі серйозної системної несправності, наприклад, випадкового пошкодження кабелів або розподільного пристрою.

Існують технічні вимоги, які повинні бути виконані для того, щоб КГУ могла працювати паралельно з місцевою системою тепlopостачання, і вони будуть визначені спільно з оператором, який володіє та експлуатує цю систему. Ці вимоги залежать від конструкції та експлуатаційних характеристик як локальної системи, так і КГУ, і їх метою є захист обладнання по обидва боки від точки підключення від наслідків несправностей, що виникають на іншій стороні.

Якщо об'єкт має достатню кількість споживачів в електричній системі, КГУ може працювати в автономному режимі, забезпечуючи електропостачання під час відключення живлення локальної мережі. Для цього необхідно, щоб об'єкт мав можливість від'єднатися від мережі та забезпечити, щоб навантаження, підключене до КГУ, було в межах її генеруючої потужності. За цих умов КГУ може працювати в «острівному режимі», щоб задовольнити деякі потреби об'єкта. Якщо об'єкт має специфічні вимоги, коли втрата електроенергії на тривалий період може призвести до значних збитків або перебоїв, КГУ слід підключити до відповідної частини електричної системи об'єкта, щоб вона могла забезпечити резервне живлення у разі необхідності. У разі використання такого обладнання, КГУ необхідно буде вимкнути до того, як об'єкт знову підключиться до локальної мережі, а потім перезапустити і синхронізувати її у звичайному режимі.

Важливо мати на увазі, що газову КГУ не слід використовувати як аварійне резервне джерело живлення для захисту життєво важливих об'єктів, таких як заклади охорони здоров'я та комп'ютерні системи. Газові двигуни і турбіни не пристосовані для автоматичного перезапуску (іноді в холодну погоду) і виходу на повну потужність за лічені секунди. Для цього потрібне інше обладнання, наприклад, генератор з дизельним двигуном.

Порівняння КГУ з газопоршневим та газотурбінним двигунами.

В роботах [21, 22] виконано термодинамічно-економічне порівняння когенераційних установок з газотурбінним та газопоршневим двигунами. Автори порівнювали газову турбіну і газовий двигун MAN одного класу потужності в трьох різних когенераційних процесах, що включають виробництво пари і гарячої води. Метою дослідження було визначення переваг і недоліків різних генераторів електроенергії, що використовуються в розглянутих процесах когенерації, щоб допомогти покупцям вибрати в якості приводу генератора газову турбіну або газопоршневий двигун в залежності від застосування. Встановлено, що газова турбіна є більш ефективним рішенням для співвідношення електричної потужності до теплової менше 0,8. При співвідношенні електричної потужності до теплової $> \sim 0,8$, системи з газовим двигуном, як правило, досягають підвищеної загальної ефективності, а також значно більшої економії первинної енергії.

Детальний опис переваг і недоліків газотурбінних електростанцій наведено в [23] у порівнянні з газопоршневими установками.

- Газові турбіни є більш шумними у порівнянні з газопоршневими двигунами, і потребують протишумного захисного обладнання. Але газові двигуни мають більший рівень низькочастотного шуму.

- Газові двигуни виробляються в більших кількостях і коштують дешевше, в той час як газотурбінне обладнання є унікальним продуктом.

- Газопоршневі електростанції мають електричний ККД 48,5-49%, а газотурбінні (простого циклу) 29-33%. Але, завдяки більшій температурі продуктів згоряння і, внаслідок цього, більшому потенціалу утилізації теплоти продуктів згоряння, газотурбінні електростанції комбінованого циклу (виробництва електроенергії та теплоти) мають вищу загальну ефективність (до 90%) у порівнянні з газопоршневими (64-77%).

- Газотурбінні двигуни не потребують водяного охолодження.

- Газотурбінні двигуни мають менші габарити та більш високе відношення потужність/вага.
- Сучасні газові турбіни мають менший рівень емісії NOx (15–25 ppm), в той час, як для газопоршневих двигунів цей показник досягає 60 ppm.
- Газові турбіни мають менший рівень вібрації.
- У порівнянні з газовими двигунами газові турбіни значно більш залежні від температури оточуючого середовища.
- Газові турбіни зазвичай використовуються на середніх та великих підприємствах для виробництва електроенергії та вироблення пари, в той час, як газопоршневі машини краще використовувати для розподіленої генерації в умовах, які потребують більшої гнучкості та можливості швидкого нарощування/спаду потужності.
- Газові турбіни мають більш тривалі інтервали технічного обслуговування у порівнянні з газопоршневими установками.
- На даний час спостерігається зростаюча тенденція до використання газових двигунів, особливо малої та середньої потужності, через їх гнучкість та ефективне задоволення потреб в електроенергії.

Фінансові аспекти впровадження когенераційної установки

Ціни на паливо. Відповідно до постанови КМУ №356 від 28 березня «Про внесення змін до Положення про покладення спеціальних обов'язків на суб'єктів ринку природного газу для забезпечення загальносуспільних інтересів у процесі функціонування ринку природного

газу» [24] з 1 квітня 2025 року, введені окремі пункти, якими встановлено наступні ціни на природний газ:

- для газотурбінних та газопоршневих установок, які виробляють виключно електричну енергію — 14 000 гривень (з урахуванням податку на додану вартість) за 1000 куб. метрів газу (цей тариф діє для теплових електростанцій (ТЕС) та ТЕЦ, які виробляють електричну енергію в конденсаційному циклі) - для газотурбінних та газопоршневих установок, які виробляють електричну та теплову енергію комбінованим способом,

- 18 000 гривень (з урахуванням податку на додану вартість) за 1000 куб. метрів природного газу (цей тариф діє для теплоелектроцентралей (ТЕЦ), які виробляють електричну енергію в теплофікаційному циклі).

Таким чином за ціною на газ газотурбінні та газопоршневі установок порівняні до відповідних об'єктів великої теплоенергетики.

Капітальні витрати. Кошти на обладнання чи саме обладнання можуть бути отримані у вигляді грантової допомоги Україні від партнерів, шляхом виділення коштів з бюджету або шляхом залучення приватних інвестиційних коштів, як приклад перша в Україні народна газопоршнева електростанція Inzhur Energy [25].

У рамках початкового техніко-економічного обґрунтування необхідно оцінити вартість установки КГУ. У випадку серійних когенераційних установок відносно легко отримати «бюджетну» оцінку в залежності від обраного первинного двигуна/електрогенератора. На графіку (рис.4) показано типові зміни вартості залежно від встановленої потужності для ринку Великої Британії [26]

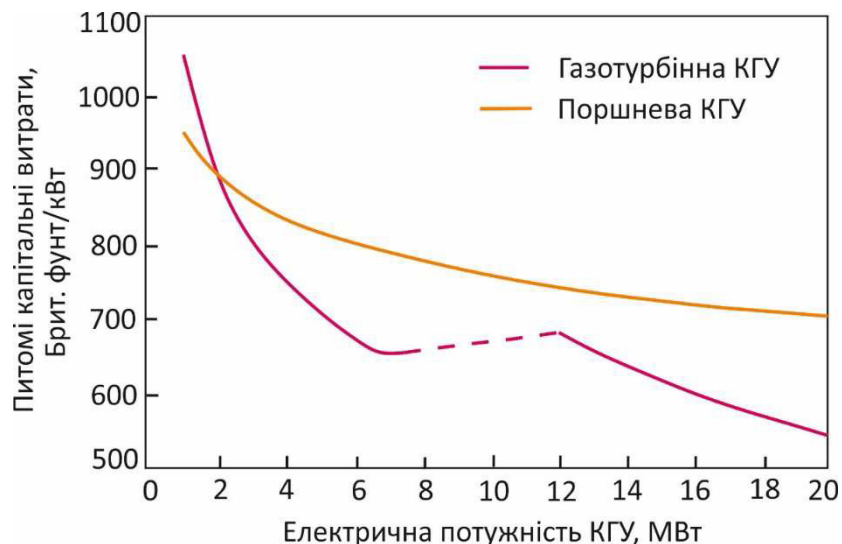


Рис. 4. Питома вартість КГУ в залежності від її потужності

Fig. 4. Specific cost of a CHP unit depending on its capacity

Експлуатаційні витрати прийнято розділяти на постійні та змінні [27]. Постійні залежать від капітальних витрат на проект, а змінні від об'єму виробленої енергії. Так згідно [27] для газопоршневих КГУ життєвий цикл складає 25 років, постійні експлуатаційні витрати складають 1,7%, а змінні – 3,25 \$/МВт·год.

Термін окупності, в залежності від ціни на електроенергію досліджено у [23]. Показано що для ринку США, де ціни на електроенергію для промисловості становлять 8-10 центів США/кВт·год, термін окупності КГУ складає 3,25 - 3,75 роки. В той же час для країн ЕС, де ціни на електроенергію для промисловості варіюються від 0,17 до 0,19 дол. США/кВт·год період окупності знижується до 1,4 - 1,6 років.

Собівартість виробленої електроенергії. Оцінка собівартості виробленої КГУ електроенергії за даними Viessmann Climate Solutions [10] на лютий 2025 р. становить 4-5 грн. Схожа собівартість електричної енергії отримана у [28]. Так для ціни природного газу у 20 грн/нм³ цей показник становив 5,18 грн/кВт год. В разі використання теплової складової, собівартість виробленої електроенергії складе 2,69 грн/кВт*год. Приведені розрахунки враховують тільки вартість палива і, на жаль, не беруть до уваги експлуатаційні витрати.

Висновки. Щоб енергосистема України була стійкішою в умовах постійних російських атак, Уряд України [29] стимулює розбудову розподіленої генерації системи виробництва і передачі електроенергії, яка налічує багато невеликих локальних енергооб'єктів, розташованих по всій Україні. Згідно з урядовою програмою, у розподіленій генерації комбінуються різні джерела енергії: газопоршневі установки, газові турбіни, сонячні панелі та акумулятори, вітряки, когенерація. А головне – споживачі залучаються до виробництва енергії, встановлюють власні генерувальні установки. Завдання Уряду [29] в розбудові розподіленої генерації - забезпечити людей та бізнес доступними фінансовими ресурсами для придбання енергетичного обладнання та максимально спростити процедури, пов'язані із будівництвом, введенням в експлуатацію та підключенням об'єктів генерації до мереж.

З ініціативи Уряду [29] скорочено перелік документів для будівництва та розміщення газопоршневих та газотурбінних установок, у тому числі - когенераційних. Будівництво генерації може проводитись паралельно з розробленням проектної документації, а експлуатація може здійснюватися без сертифіката про прийняття в експлуатацію. Не потрібно отримувати: відповідну містобудівну документацію; містобудівні умови та обмеження забудови земельної ділянки; звіт про резуль-

тати експертизи проектної документації на будівництво об'єктів; право на виконання будівельних робіт; оцінку впливу на довкілля. Також стали спрощені процедури приєднання до електричних і теплових мереж та газорозподільних систем.

Побудова розподіленої генерації на базі газопоршневих двигунів, дозволяє вирішити в короткі терміни проблему стабільності енергетичної системи України. Сучасні газопоршневі двигуни, спроможні ефективно працювати на низько- та середньокалорійних газах, які можуть бути отримані шляхом термічної конверсії місцевих видів палива.

Загалом розвиток децентралізованої енергетики сьогодні – один із головних напрямів у розвитку енергетики України найближчого майбутнього. Це підвищить стійкість та надійність енергетичної системи, збільшить здатність до функціонування в безперебійному режимі в умовах воєнного та післявоєнного часу.

Робота виконано за науковим проектом "Розвиток розподіленої енергетики на основі використання газотурбінних і газопоршневих технологій та місцевих альтернативних видів палива в період воєнного стану і відновлення України" в межах цільової програми НАН України "Наукові і науково-технічні (експериментальні) роботи за пріоритетним напрямом "Енергетичні технології і системи, розподілена енергетика та водопостачання" на 2025-2026 рр."

ЛІТЕРАТУРА:

1. *Децентралізована генерація як можливість зміцнення та оновлення української енергосистеми.* URL: <https://rehouse.org.ua/counsellor/detsentralizovana-heneratsiya-yak-mozhlyvist-zmitsnennya-ta-onovlennya-ukrayinskoji> (дата звернення: 11.08.2025).
2. *Як когенераційні установки стають ключем до нової енергетичної моделі України у 2025 році.* URL: <https://censor.net/ua/b3550238> (дата звернення: 11.08.2025).
3. *Чеська RSE поставить газопоршневі установки для проекту Power One.* URL: <https://epravda.com.ua/biznes/cheska-rse-postavit-gazoporshnevi-ustanovki-dlya-proyektu-power-one-809331/> (дата звернення: 11.08.2025).
4. *Алабовский А.Н. Недужий И.А. Техническая термодинамика и теплопередача.* - 3-е изд., перераб. и доп. - К.: Вища школа, 1990. - 256 с.

5. *Термодинаміка газового потоку* [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студ. спеціальності 105 «Прикладна фізика та наноматеріали» / А. А. Халатов, А. В. Гільчук, Л.М.Кохтич; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 219 с.
6. *Когенерационные системы с тепловыми двигателями: справочное пособие. Часть 3: Инновационные технологии для когенерации* / В. Н. Клименко, А. И. Мазур, Е. Н. Письменный и др. // Институт технической теплофизики НАН Украины. – К. : ИПЦ АЛКОН НАН Украины, 2016 – 528 с.: ил. 292, табл. 124. ISBN 978-966-8449-28-4
7. *Когенераційні установки – ваша енергетична незалежність*. URL: <https://www.viessmann.ua/uk/porady/tekhnohija-i-systemy/teploelektrosentrali.htm> (дата звернення: 11.08.2025).
8. *Michael A. Devine. More Than Heat and Power: A Fresh Look At Cogeneration*. White paper, Caterpillar Inc. 2019.
9. *Склад основних компонентів когенераційної установки*. URL: <https://gas-power.madek.ua/> (дата звернення: 11.08.2025)
10. *Інвестиція в кіловати. Чому власна когенерація в Україні запит №1 від бізнесу*. URL: <https://biz.nv.ua/ukr/markets/vidklyuchennya-svitla-kogeneracijni-ustanovki-alternativa-stanciyam-i-generatoram-vsi-detali-50481820.html> (дата звернення: 11.08.2025)
11. *Jenbacher*. <https://www.jenbacher.com/en> (дата звернення: 11.08.2025)
12. *MWM*. URL:<https://www.mwm.at/> (дата звернення: 11.08.2025)
13. *Caterpillar Energy Solutions*. URL:<https://caterpillar-energy-solutions.de/en/products/gas-engines-gensets/> (дата звернення: 11.08.2025)
14. *Cummins Power*. URL:https://cummins-power.com.ua/page/14/producs_generators.html (дата звернення: 11.08.2025)
15. *Liebherr*. URL:<https://www.liebherr.com/en-int/components/solutions/combustion-engines/gas-engines-5374008> (дата звернення: 11.08.2025)
16. *Wärtsilä*. URL:<https://www.wartsila.com/energy/solutions/engine-power-plants>(дата звернення: 11.08.2025)
17. *Everllence*. URL:<https://www.everllence.com/energy/products/gas-fuel-engines/> (дата звернення: 11.08.2025)
18. *MTU*. URL:<https://www.mtu-solutions.com/eu/en/applications/power-generation/power-generation-solutions.html> (дата звернення: 11.08.2025)
19. *Doosan*. URL:<https://www.doosanenergy.com/en> (дата звернення: 11.08.2025)
20. *Халатов А., Фіалко Н.* Газотурбінні та газопоршневі електростанції для децентралізованої енергетики України. Системні дослідження в енергетиці. 2025. № 1. С. 4-14. <https://doi.org/10.15407/srenergy2025.01.004>
21. *K. Saidi, U. Orth, S. Boje, C. Frekers.* A Comparative Study of Combined Heat and Power Systems for a Typical Food Industry Application; ASME Turbo Expo 2014, GT2014-26234
22. *Hajo Hoops, Karim Saidi.* Gas turbine vs. gas engine/ MAN Energy Solutions, https://www.man-es.com/docs/default-source/energy-storage/orchestrated-heat-and-power/man-es_mgt_technical_paper_preview.pdf?sfvrsn=51cf6dd6_6 (дата звернення: 11.08.2025)
23. *Michael A. Devine, Chris Lyons.* Engines? Turbines? Both? Choosing Power for CHP Projects. Caterpillar Inc., 2019. 10p.
24. *Постанова КМУ №356* від 28 березня «Про внесення змін до Положення про покладення спеціальних обов'язків на суб'єктів ринку природного газу для забезпечення загальносуспільних інтересів у процесі функціонування ринку природного газу». URL: <https://www.kmu.gov.ua/npas/-spetsi-zahalnosuspilnykh-interesiv-u-protsezi-funktsionuvannia-rynku-prirodnohazhu-i-35> (дата звернення: 11.08.2025)
25. *Mind.ua* URL:<https://mind.ua/publications/202897-25-popri-tisk-prokuraturi-inzhur-pobudue-trielektrostanciyi-na-75-mln-i-vidstoyue-u-sudi-pravoukrayinc> (дата звернення: 11.08.2025)
26. *Combined Heat and Power – Finance*/ URL:<https://www.gov.uk/government/collections/combined-heat-and-power-chp-developers-guides> (дата звернення: 11.08.2025)
27. *Timilsina, Govinda R.* 2020. Demystifying the Costs of Electricity Generation Technologies. Policy Research Working Paper;No. 9303. © World Bank. <http://hdl.handle.net/10986/34018> License: CC BY 3.0 IGO.”
28. *Вартість вироблення електричної енергії газопоршневими генераторами та когенераційними установками*/ URL: <https://teplo.zp.ua/gas-fired-chp-vs-grid-electricity-price/> (дата звернення: 11.08.2025)
29. *Розвиток розподіленої генерації*. URL:<https://mev.gov.ua/reforma/rozvytok-rozpodilenoji-heneratsiyi> (дата звернення: 11.08.2025)

RECIPROCATING GAS ENGINES IN THE DISTRIBUTED ENERGY SECTOR OF UKRAINE

Khalatov A.A.¹, Kobzar S.G.², Borysov I.I.³,
Fialko N.M.⁴

Institute of Engineering Thermophysics, National Academy of Sciences of Ukraine, 2a, Kapnist str., Kyiv 03057, Ukraine

¹*Academician of the National Academy of Sciences of Ukraine, Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a Maria Kapnist St., Kyiv, Ukraine, 03057, Professor; e-mail: artem.khalatov1942@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-7659-4234>*

²*PhD (Engin.), Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a, Maria Kapnist str., Kyiv, 03057, Ukraine, Leading Researcher, Senior Research Scientist, <https://orcid.org/0000-0002-8615-4400>, e-mail: sergiykobzar@gmail.com*

³*PhD (Engin.), Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a, Maria Kapnist str., Kyiv, 03057, Ukraine, Leading Researcher, Senior Research Scientist, <https://orcid.org/0000-0001-7696-3901>, e-mail: borisov010@gmail.com*

⁴*Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Ukraine, Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a, Maria Kapnist str., Kyiv, 03057, Ukraine, Professor; orcid.org/0000-0003-0116-7673, e-mail: nmfialko@ukr.net*

<https://doi.org/10.31472/ttpe.4.2025.9>

The war in Ukraine has posed new challenges for the country's energy sector. The Ukraine's integrated energy sector was built as a centralised system with large hub power plants and a high-voltage power transmission system. This configuration is vulnerable to enemy attacks. It is actually impossible to protect large power plants (especially thermal power plants and combined heat and power plants), and the destruction of these facilities leads to power outages for a large number of consumers. The purpose of this article is to consider the technical and economic aspects of the constructing distributed generation based on gas reciprocating engines to ensure a stable energy supply in Ukraine.

Gas engine-based cogeneration systems are truly impressive in terms of their energy-saving capabilities and reduction of noise and vibration levels. Their main advantage

is high energy conversion efficiency: compared to separate electricity and heat generation systems, cogeneration systems can save up to 40% of primary energy.

Installing such systems in close proximity to consumers significantly reduces energy losses during transmission and distribution. In addition, thanks to low noise and vibration levels, such stations can be located close to end users, making them a convenient solution for urban and industrial areas.

Engine exhaust gases have the highest potential. The typical exhaust gas temperature is around 460°C. Exhaust heat can generate medium-pressure steam for purposes such as heating boiler feed water, and low-pressure steam for processes such as sterilisation, pasteurisation, space heating, tank heating, humidification and others. In addition, supplementary combustion with natural gas can increase exhaust gas temperatures and heat transfer, allowing more steam to be produced at higher volumes and pressures, opening up even more possibilities.

The modular design means relatively low capital investment in the 1 to 60 MW power range. The frequency and complexity of repairs depend on the type of engine (high- or medium-speed engine, number of cylinders, etc.) and the type of fuel used. In general, the engines are designed for continuous operation for 25–30 years at a rate of 8,000 hours per year, provided that scheduled maintenance and proper technical servicing are carried out.

The main types and thermodynamic cycles of engines are analysed, and a comparison with gas turbine installations was made. It was found that a gas turbine is a more efficient solution for a ratio of electrical power to thermal power of less than 0.8. When the ratio of electrical power to thermal power is $> \sim 0.8$, gas engine systems generally achieve higher overall efficiency and significantly greater primary energy savings.

Conclusions. The construction of distributed generation based on gas reciprocating engines allows solving the problem of stability of the Ukrainian energy system in a short time. Modern gas reciprocating engines are capable of operating efficiently on low- and medium-calorific gases, which can be obtained by thermal conversion of local fuels.

In general, the development of decentralised energy is one of the main directions in the development of Ukraine's energy sector in the near future. This will increase the stability and reliability of the energy system and improve its ability to function uninterruptedly in wartime and post-war conditions.

References 29, figures 4.

Key words: distributed generation, gas reciprocating engine, modular power plant, operating modes.

1. *Decentralized generation* as an opportunity to strengthen and modernise the Ukrainian energy system. Retrieved August 11, 2025, from <https://rehouse.org.ua/counsellor/detsentralizovana-heneratsiya-yak-mozhlyvist-zmitsnennya-ta-onovlennya-ukrayinskoyi> (Ukr).
2. *How Cogeneration Plants Are Becoming the Key to Ukraine's New Energy Model in 2025*. Retrieved August 11, 2025, from <https://censor.net/ua/b3550238> (Ukr).
3. *Czech RSE to supply gas piston units for Power One project*. Retrieved August 11, 2025, <https://pravda.com.ua/biznes/cheska-rse-postavit-gazoporshnevi-ustanovki-dlya-proyektu-power-one-809331/> (Ukr).
4. *Алабовский А.Н. Недужий И.А. Техническая термодинамика и теплопередача*. - 3-е изд., перераб. и доп. - К.: Вища школа, 1990. - 256 с. Alabovskiy A.N., Neduzhyy I.A. *Tekhnichna termodynamika i teploperedacha* [Technical thermodynamics and heat transfer]. – 3-е изд., перераб. i dop.– К.: Vyshcha shkola, 1990. – 256 s. (rus)
5. *Termodynamika hazovoho potoku: navch. posib. dlia stud. spetsialnosti 105 «Prykladna fizyka ta nanomaterialy»* [Thermodynamics of gas flow: textbook for students majoring in 105 'Applied Physics and Nanomaterials'] / A. A. Khalatov, A. V. Hilchuk, L. M. Kokhtych; KPI im. Ihoria Sikorskoho. – Kyiv : KPI im. Ihoria Sikorskoho, 2019. – 219 s. (Ukr)
6. *Koheneratsiini systemy z teplovymy dvyhateliamy: spravochne posibnyk. Chastyna 3: Innovatsiini tekhnolohii dlia koheneratsii* [Cogeneration systems with heat engines: reference guide. Part 3: Innovative technologies for cogeneration] / V. N. Klimenko, A. I. Mazur, Ye. N. Pysmennyi ta in. // Instytut tekhnichnoi teplofizyky NAN Ukrainy. – К.: ITsP ALKON NAN Ukrainy, 2016. – 528 s.: ISBN 978-966-8449-28-4 (Rus)
7. *Cogeneration plants – your energy independence*. Retrieved August 11, 2025, from <https://www.viessmann.ua/uk/porady/tekhnolohiya-i-systemy/teploelektrotsentrali.htm> (Ukr)
8. *Michael A. Devine. More Than Heat and Power: A Fresh Look At Cogeneration*. White paper, Caterpillar Inc. 2019.
9. *Composition of the main components of a cogeneration plant*. Retrieved August 11, 2025 from <https://gas-power.madek.ua/> (Ukr)
10. *Investment in kilowatts*. Why own cogeneration in Ukraine is the number one request from businesses. Retrieved August 11, 2025 from <https://biz.nv.ua/ukr/markets/vidklyuchennya-svitla-kogeneraciyni-ustanovki-alternativa-stanciyam-i-generatoram-vsi-detali-50481820.html> (Ukr)
11. *Jenbacher*. Retrieved August 11, 2025 from <https://www.jenbacher.com/en>
12. *MWM*. Retrieved August 11, 2025 from <https://www.mwm.at/>
13. *Caterpillar Energy Solutions*. Retrieved August 11, 2025 from <https://caterpillar-energy-solutions.de/en/products/gas-engines-gensets/>
14. *Cummins Power*. Retrieved August 11, 2025 from https://cummins-power.com.ua/page/14/products_generators.html
15. *Liebherr*. Retrieved August 11, 2025 from <https://www.liebherr.com/en-int/components/solutions/combustion-engines/gas-engines-5374008>
16. *Wärtsilä*. Retrieved August 11, 2025 from <https://www.wartsila.com/energy/solutions/engine-power-plants>
17. *Everllence*. Retrieved August 11, 2025 from <https://www.everllence.com/energy/products/gas-fuel-engines/>
18. *MTU*. Retrieved August 11, 2025 from <https://www.mtu-solutions.com/eu/en/applications/power-generation/power-generation-solutions.html>
19. *Doosan*. Retrieved August 11, 2025 from <https://www.doosanenergy.com/en>
20. *Khalatov, A., Fialko, N.* Gas turbine and gas piston power plants for distributed energy sector of Ukraine. *System Research in Energy*, 2025, № 1, 4-14. <https://doi.org/10.15407/srenergy2025.01.004> (Ukr)
21. *K. Saidi, U. Orth, S. Boje, C. Frekers.* A Comparative Study of Combined Heat and Power Systems for a Typical Food Industry Application; ASME Turbo Expo 2014, GT2014-26234
22. *Hajo Hoops, Karim Saidi.* Gas turbine vs. gas engine/ MAN Energy Solutions, Retrieved August 11, 2025 from https://www.man-es.com/docs/default-source/energy-storage/orchestrate-heat-and-power/man-es_mgt_technical_paper_preview.pdf?sfvrsn=51cf6dd6_6
23. *Michael A. Devine, Chris Lyons.* Engines? Turbines? Both? Choosing Power for CHP Projects. Caterpillar Inc., 2019. 10p.
24. *Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine No. 356 of 28 March 'On Amendments to the Regulation on Imposing Special Obligations on Natural Gas Market Participants to Ensure Public Interests in the Functioning of the Natural Gas Market.'* Retrieved August 11, 2025 from <https://www.kmu.gov.ua/npas/-spetsi-zahalnosuspilnykh-interesiv-u-protsesi-funktsionuvannia-rynku-pryrodohohazu-i-35> (Ukr)
25. *Mind.ua* Retrieved August 11, 2025 <https://mind.ua/publications/20289725-popri-tisk-prokuraturi-inzhur-pobudue-tri-elektrostanciyi-na-75-mln-i-vidstoyue-u-sudi-pravo-ukrayinc>

26. *Combined Heat and Power – Finance*/ Retrieved August 11, 2025 from <https://www.gov.uk/government/collections/combined-heat-and-power-chp-developers-guides>

27. *Timilsina, Govinda R.*. 2020. Demystifying the Costs of Electricity Generation Technologies. Policy Research Working Paper; No. 9303. © World Bank. <http://hdl.handle.net/10986/34018> License: CC BY 3.0 IGO.”

28. *The cost of generating electricity using gas piston generators and cogeneration units*. Retrieved August 11, 2025 from <https://teplo.zp.ua/gas-fired-chp-vs-grid-electricity-price/>

29. *Development of distributed generation*. Retrieved August 11, 2025 from <https://mev.gov.ua/reforma/rozvytok-rozpodilenoyi-heneratsiyi> (Ukr)

Отримано 01.09.2025

Received 01.09.2025

Прийнято до друку 04.11.2025
Accepted for publication 04.11.2025