

УДК 338.2

Артем Халатов^{1,2*}, д-р техн. наук, професор, <https://orcid.org/0000-0002-7659-4234>

Наталія Фіалко^{1,2}, д-р техн. наук, професор, <https://orcid.org/0000-0003-0116-7673>

¹Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Капніст, 2а, Київ, 03680, Україна;

²Інститут загальної енергетики НАН України, вул. Антоновича, 172, Київ, 03150, Україна

*Автор-кореспондент: Artem.Khalatov1942@gmail.com

ГАЗОТУРБІННІ ТА ГАЗОПОРШНЕВІ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ ДЛЯ ДЕЦЕНТРАЛІЗОВАНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ УКРАЇНИ

Анотація. У статті виконано аналіз техніко-економічних характеристик газотурбінних та газопоршневих електростанцій, які широко застосовуються для виробництва електроенергії, теплоти та холоду. На даний час у світі випускається широкий діапазон ГТУ простого циклу потужністю 200–300 МВт (ККД 35–40 %) і до 600 МВт – в комбінованому циклі (ККД 60 % і більше). Мікротурбіни представляють клас малопотужних (10–400 кВт) генераторів електричної та теплової енергії. ККД мікротурбіни у простому циклі становить 15–19 % та 25–38 % – у регенеративному. За потреби вони можуть об'єднуватися у кластери. Діапазон електричної потужності газопоршневих електростанцій змінюється від кількох кіловат до 20 МВт, вони можуть формувати модульні електростанції та блоки-ТЕЦ для виробництва електроенергії та теплоти. Ці технології найближчим часом стануть основою розподіленої енергетики України, що підвищить її стійкість та надійність, а також здатність функціонувати у безперебійному режимі в умовах воєнного та післявоєнного часу. Вони мають низку позитивних якостей, таких як високий електричний ККД, відносно низькі шум і вібрації при роботі, широкий діапазон потужності, низькі втрати електроенергії, економічна робота на часткових режимах, серійне виробництво та розвинений сервіс, можливість використання різних видів палива. Хоча електричний ККД газопоршневих машин на 3–10 % вищий, але на режимах когенерації коефіцієнт використання палива у газових турбінах близький до показників газопоршневої машини. Газотурбінні та газопоршневі електростанції можуть бути широко використані в міських та сільських умовах, на промислових підприємствах, нафто- та газопромислах, а також на прибережних суднах та залізничних платформах для подачі електроенергії в регіони, де електростанції відсутні або їх будівництво економічно недоцільне. Екологічні характеристики, у тому числі газопоршневих електростанцій, задовольняють вимоги щодо викидів шкідливих продуктів, які за потреби можуть бути знижені за рахунок встановлення каталітичних систем на виході. Газотурбінні та газопоршневі електростанції малої та середньої потужності постачаються у блочно-контейнерному виконанні та вводяться в експлуатацію протягом 6–12 місяців.

Ключові слова: газова турбіна, мікротурбіна, газопоршнева машина, децентралізована енергетика.

1. Вступ

В результаті воєнних дій інфраструктура енергетики України зазнала важких втрат – було знищено понад 8 ГВт генерації електричної енергії (80 % ТЕС та 40 % ГЕС), що призвело до віяльних відключень електроенергії з травня 2024 р. На тимчасово окупованій території відновлювана енергетика втратила 80 % вітрових станцій та 20 % сонячних. Загалом, генерація електроенергії на лівому березі Дніпра практично зруйнована, потужність енергетичної системи України у липні 2024 р. становила лише близько 10 ГВт (8 ГВт – атомна енергетика), при цьому «піковий» попит

близько 12 ГВт. Нестача потужностей покривалася за рахунок імпорту електроенергії з Євросоюзу обсягом 1,7 ГВт. У зимовий період 2024–25 рр. «піковий» попит електроенергії в Україні може зростати до 18 ГВт з дефіцитом 4–6 ГВт. За допомогою ЄС планується до грудня 2024 р. відновити до 2 ГВт генеруючих потужностей, збільшити імпорт електроенергії до 2 ГВт, ввести в експлуатацію до 1 ГВт розподіленої генерації (газові турбіни) і використати до 200 МВт аварійної допомоги з європейських країн. Це становитиме майже 80 % потужності, яка потрібна Україні в зимовий період 2024–25 рр., що становить близько 0,5 кВт встановленої потужності на 1 мешканця України (у США – близько 10 кВт).

Для збереження витривалості та підвищення стійкості енергетичної системи країни Кабінет Міністрів України розробив програму суттєвого розширення децентралізованої (розподіленої) енергетики. Децентралізована енергетика є системою джерел енергії малої та середньої потужності (газотурбінні, мікротурбінні та газопоршневі електростанції, теплові насоси, сонячні батареї, вітрові генератори, паливні елементи, когенераційні установки та ін.), розташованих у безпосередній близькості від джерела споживання. Порівняно з традиційними джерелами енергії (атомна, тепла, гідроелектростанції) децентралізовані джерела (газотурбінні, газопоршневі, сонячні та вітрові електростанції, теплові насоси та паливні елементи) мають високу маневреність, широко використовують місцеві види палива, характеризуються низькими втратами при транспортуванні електроенергії, забезпечують надійне функціонування енергетичної системи при аваріях та пошкодженнях внаслідок воєнних дій. Потужність таких джерел варіюється від 2–3 до сотень і тисяч кіловат. Однак повна відмова від потужних атомних та теплових електростанцій неможлива як з економічних міркувань, так і у зв'язку зі складністю управління безліччю відносно малих об'єктів та підтримки балансу генерації та споживання.

Концептуальні підходи до розвитку енергетики та комунальної теплоенергетики України до початку воєнних дій розглянуті у роботах [1, 2]. За цих умов децентралізована енергетика України активно розвивалася на основі енергії Сонця, вітру, міні-гідроелектростанцій, біомаси та біогазу [3]. На даний час Кабінет Міністрів приділяє велику увагу розвитку децентралізованої енергетики на основі газотурбінних та газопоршневих електростанцій, які мають певні переваги в умовах воєнного та післявоєнного часу.

Мета цієї статті – виконати аналіз основних техніко-економічних показників газотурбінних та газопоршневих електростанцій та визначити умови їх найбільш ефективного використання у розподіленій енергетиці України.

2. Обговорення

2.1. Газотурбінні електростанції

Газотурбінні установки (ГТУ) широко використовуються для виробництва електричної та теплової енергії [4]. Вони мають невелику масу та габарити, доставляються у блочному виконанні, характеризуються невисокими капітальними витратами на будівництво електростанцій (500–800 \$/кВт), розвиненим сервісом, високою маневреністю (набір повної потужності за 20–30 хв) та досить швидкою окупністю інвестицій. Сьогодні у світі випускається широкий діапазон ГТУ простого циклу потужністю до 200–300 МВт та до 600 МВт – у парогазовому. ККД ГТУ у простому циклі становить 35–40 %, а у парогазовому циклі у потужних парогазових установках (ПГУ) він навіть перевищує 60 %. У простому циклі витрати умовного палива на виробництво 1 кВт·год електричної енергії становлять 340–360 г палива, а у парогазовому циклі вони знижуються до 280–290 г. У середньому при спалюванні 1 м³ газу в ПГУ можна отримати 4–5 кВт·год електричної енергії та 3–4 кВт·год теплової. Як паливо в ГТУ використовується природний, доменний та коксовий газ, рідке паливо, продукти нафтопереробки, газифікації вугілля та нафтового коксу. Рівень шкідливих викидів не перевищує 50 мг/м³ по NO_x та 100 мг/м³ – по СО. Життєвий цикл ГТУ при середньорічній експлуатації на рівні 6800 годин становить близько 200 тис. годин і 20–30 тис. годин – до капітального ремонту.

За кордоном відомими виробниками малих та середніх ГТУ та ПГУ є «Siemens AG» (Німеччина) (рис. 1), «General Electric», «Pratt & Whitney Power Systems», «Solar Turbines Inc.» (всє США), «Rolls-Royce» (Великобританія), «Nuovo Pignone» (Італія), в Україні – «Завод ім. В.О. Малишева».

Для малих населених пунктів та підприємств значний інтерес становлять ГТУ середньої потужності 30–70 МВт (рис.1) [5] – з розрахунку 0,5–0,7 кВт встановленої потужності на 1 особу, які виготовляються в контейнерному варіанті з повним заводським складанням (термін введення в експлуатацію 6–12 міс.). Для великих міст України (Київ, Харків, Одеса), де споживання електроенергії є значним, необхідно використовувати газотурбінні та парогазові установки потужністю 200–600 МВт, які виробляються серійно за кордоном. Великий тепловий потенціал вихлопних газів ГТУ (450–550°C) дозволяє використовувати їх у когенераційному циклі з виробництвом теплової енергії з коефіцієнтом 1:2 по відношенню до електричної потужності. Використання «скидної» теплової енергії відкриває широкі можливості для реконструкції котелень, ТЕЦ та паротурбінних електростанцій, спільної роботи ГТУ зі стандартними водогрійними та паровими котлами. В цьому випадку коефіцієнт використання палива збільшується до 90 %.



Рисунок 1. Газова турбіна «Siemens SGT600», електрична потужність 25 МВт [5]

Україна входить до десяти країн світу, які мають повний цикл проектування та виготовлення газових турбін простого та парогазового циклу малої та середньої потужності, що створює сприятливі умови для виробництва в Україні відносно недорогих та мобільних газотурбінних електростанцій. В ДП НВКГ «Зоря»-«Машипроект» (м. Миколаїв) серійно виготовляються ГТУ простого циклу потужністю від 3 до 25 МВт [4, 6] з ККД 32–36,3 %, створено проекти парогазових установок потужністю до 70 МВт із ККД 45,3 %–48,5 %. У найближчій розробці знаходяться ГТУ потужністю 45/60 МВт і ПГУ-85 та ПГУ-170 на її основі, і регенеративна ГТУ-16Р потужністю 16 МВт з ККД понад 40 %. Газотурбінні електростанції ДП НВКГ «Зоря»-«Машипроект» успішно працюють в Україні та за кордоном (рис. 2). У ДП «Івченко-Прогрес» та АТ «Мотор-Січ» (м. Запоріжжя) спроектовані та серійно випускаються газові турбіни простого циклу для електростанцій потужністю до 12 МВт.

Широкого розповсюдження у світі набули мобільні електростанції на основі ГТУ для тимчасового покриття потреб в електроенергії. Для цього використовуються судна та баржі, переобладнані з існуючих конструкцій, де в якості силової установки застосовуються газові турбіни. Як паливо використовується скраплений природний газ, мазут з низьким вмістом сірки та біодизель, які подаються від допоміжного судна. Підключення до наземних електричних мереж здійснюється за допомогою спеціального кабелю завдовжки до 1 км. Як показує досвід, баржі-електростанції є більш рентабельними та затребуваними, а коефіцієнт їх використання сьогодні становить до 95 %.



Рисунок 2. Газотурбіна електростанція ДП НВКГ «Зоря»-«Машпроект». Електрична потужність 6 МВт. Установлена в Південно-Східній Азії [6]

Більше 10 років тому компанія *Waller Marine* (США) встановила у Венесуелі дві плавучі баржі з газовими турбінами GE 7FA потужністю 171 МВт. Корпорація *Power Barge* (США) поставила до Анголи баржу з газовою турбіною потужністю 96 МВт. Турецька компанія *Karpowership* пропонує для використання плавучі баржі сумарною потужністю до 2 ГВт (найбільша з них потужністю 500 МВт). Ціна електроенергії за 1 кВт·год становить 0,20–0,25 євро, що приблизно відповідає ціні електроенергії для промисловості в Одеській області. Компанія *Siemens Energy* (Німеччина) пропонує Україні мобільні плавучі електростанції потужністю від 150 до 300 МВт для розміщення в районі Одеси, Миколаєва та Ізмаїла. Широкого розповсюдження набули також пересувні електростанції на залізничній платформі (енергопоїзди) з газовою турбіною в якості електрогенеруючої установки. В Україні виробництво енергопоїздів на базі авіаційних та суднових газотурбінних двигунів потужністю до 16 МВт освоїли ДП НВКГ «Зоря»-«Машпроект» (м. Миколаїв) і АТ «Мотор-Січ» (м. Запоріжжя).

2.2. Мікротурбіни

Мікротурбіни (рис. 3) становлять клас малопотужних (10–400 кВт) газотурбінних генераторів електричної та теплової енергії [7]. Життєвий цикл мікротурбіни в середньому становить 100 тис. год. Газова турбіна виконується одновальною, частота обертання ротора становить 45–110 тис. об/хв. Коефіцієнт корисної дії мікротурбіни – 15–19 % у простому циклі та 25–38 % при роботі в регенеративному. Температура експлуатації становить від –40 до +50°C. У режимі когенерації при виробництві 1 кВт·год електроенергії мікротурбіна виробляє в середньому до 1,7 кВт·год теплоти. Наприклад, газотурбінна установка *Calnetix* потужністю 100 кВт забезпечує теплову потужність 120–210 кВт. Важливо відмітити, що зі збільшенням ступеня регенерації полегшуються умови для роботи компресора внаслідок зниження необхідного тиску повітря перед турбіною.

Мікротурбіни компактні, надійні, прості в експлуатації та обслуговуванні, можуть працювати як автономно, так і паралельно з мережею. При тиску мережного газу менше 0,03 МПа використовується вбудований дотискний компресор, але при тиску 0,55 МПа і вище мікротурбіна не вимагає його використання. Час набору повної потужності після старту становить кілька хвилин, рівень шуму – 65–70 дБа. Як паливо використовується природний, попутний, нафтовий, генераторний газ, біогаз та дизельне паливо. У камері згоряння використовується принцип спалювання збідненої суміші з попереднім змішуванням, що дозволяє уникнути формування локальних зон високої температури, де утворюються оксиди азоту. В останні роки проводяться дослідження в області каталітичних (безполум'яних) камер згоряння із практично повним згорянням палива.



Рисунок 3. Мікротурбіни компанії Capstone (США) [8]

Газова турбіна виконується неохолоджуваною, температура продуктів згоряння перед мікротурбіною становить $900\text{--}950^{\circ}\text{C}$, на виході з неї – до 650°C , а після регенератора $250\text{--}300^{\circ}\text{C}$. Цей потік може використовуватися в котлі-утилізаторі для нагрівання мережної води. У роботі [9] розглянуто концепцію керамічної мікротурбіни, що дозволило підвищити температуру потоку до 1350°C та досягти ККД циклу 38 %. Однак проблеми широкого використання кераміки в конструкції мікротурбіни поки що зберігаються та вимагають подальшого вивчення. Сьогодні найактивніші дослідження в галузі керамічних мікротурбін проводяться в США та Японії.

Роботи над створенням мікротурбін було розпочато у США, Європі та Японії наприкінці ХХ ст. з метою створення надійних, автономних, низькоемісійних джерел електро- та теплопостачання в діапазоні 30–300 кВт. У 1997–99 рр. на ринку з'явилися установки Т45 та Т60 компаній *Elliott Energy Systems* (потужність 45 та 60 кВт), С30 та С60 компанії *Capstone Turbine Corporation* (30 та 60 кВт), Parallon 75 компанії *Honeywell Power Systems* (75 кВт) та Т100 компанії *Turbec* (100 кВт). На даний час на ринку добре відомі мікротурбіни компаній *Ingersoll-Rand Energy Systems* (250 кВт), *UTC Power* (170–341 кВт), *Toyota Turbine Systems*, *Kawasaki Heavy Industries*, *Pratt & Whitney*, *General Motors*, *Solar Turbines* та інші. Сьогодні визнаним лідером у галузі мікротурбінних технологій є компанія *Capstone Turbine Corporation* (США).

У порівнянні з газопоршневими агрегатами мікротурбіни мають значно нижчий рівень шкідливих викидів, вищий моторесурс до капітального ремонту, можливість тривалої роботи в широкому діапазоні зміни навантаження, практично повну відсутність вібрацій, нижчі (у 2–2,5 рази) експлуатаційні витрати, малу вагу та займану площу, відсутність рухомих частин, які вимагають великої витрати паливно-мастильних матеріалів. Хоча електричний ККД у газопоршневої машини на 3–10 % вищий, але на режимах когенерації та тригенерації коефіцієнт використання палива мікротурбін становить 90–96 %, що близько до показників газопоршневої машини. Високі екологічні характеристики та низький рівень шуму роблять мікротурбіни перспективними для застосування у міських умовах із щільною житловою забудовою.

На даний час накопичено значний досвід використання мікротурбін у міському господарстві як джерела децентралізованого електро- та теплопостачання і виробництва холоду. Це промислові підприємства, офісні, торгові та розважальні центри, басейни, лікарні, навчальні заклади, об'єкти ЖКГ, які потребують постійної подачі електроенергії, теплоти і холоду. В останньому випадку деяка частина теплоти використовується в регенеративному циклі (нагрівання повітря після компресора), а решта – для вироблення холоду за допомогою абсорбційних машин, теплових насосів або теплообмінних систем за циклом Майсоценка [10]. Добре відомі приклади використання мікротурбін для сушіння (Нідерланди), обігріву теплиць та офісів (Великобританія), в телекомунікації, в оборонній техніці, при виробленні холоду та зберіганні заморожених продуктів (Японія).

Мікротурбінні електростанції поставляються, як правило, у блочно-контейнерному виконанні. Для підвищення потужності вони можуть об'єднуватись у кластери до 100 одиниць. Для роботи такого кластера в режимі максимальної ефективності використовується спеціальний контролер. Кластери широко використовуються у комунальному господарстві США та Європи. Наприклад, у Лос-Анджелесі (США) кластер із 50 мікротурбін, що працює на звалищному біогазі, виробляє електроенергію, достатню для забезпечення 1500 будинків. На заводі пластмасових виробів у США (штат Нью-Йорк) в автономному режимі працює когенераційна установка із 25 мікротурбін сумарною електричною потужністю 750 кВт.

Розрахунки показують, що мікротурбіни стають конкурентними з іншими установками за рівнем ККД при ефективності рекуператора 80–85 % і сумарних втратах тиску в ньому не більше 5–6 %. Рекуператор повинен мати ресурс щонайменше 40000 год і компактність на рівні 1000–1700 м³/м². Питома вартість рекуператора не має перевищувати 100–140 \$/кВт. Більшість сучасних рекуператорів є апаратами пластинчастого типу (рис. 4) або на основі вихрової матриці. Для їх виготовлення використовується дороговартісна сталь 347 на основі хрому та нікелю (робота в окисному середовищі з водяними парами при $t = 600\text{--}700^\circ\text{C}$). На даний час вивчається можливість використання більш дешевої листової фольги та керамічних матеріалів.

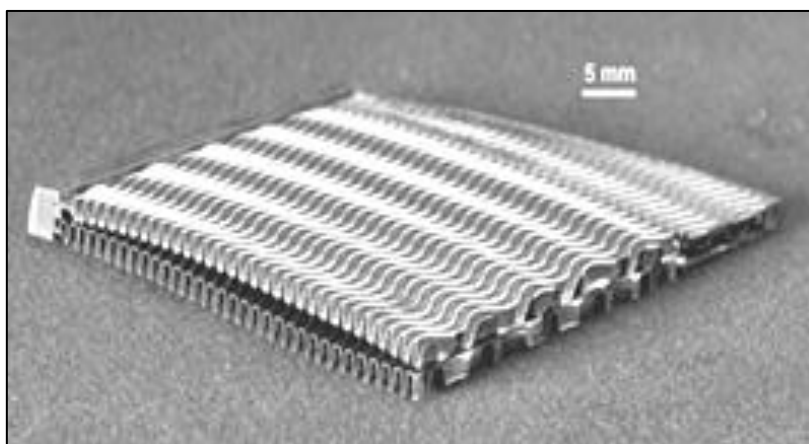


Рисунок 4. Теплообмінна поверхня рекуператора: трапецеподібна, синусоподібні гофри

Важливою обставиною на користь широкого використання мікротурбін є можливість застосування місцевих видів палива, зокрема біогазу, робота в широкому діапазоні зміни навантаження (від 0 до 100 %), в умовах жорстких обмежень викидів шкідливих продуктів в атмосферу, висока якість електроенергії на всіх режимах роботи. Однак використовувати мікротурбіну як резервне джерело енергії не рекомендується через обмеження за кількістю запусків.

Незважаючи на приблизно однакову питому вартість мікротурбін та газопоршневих установок, вартість проєктів може бути різною та залежить від вимог споживача. Питома вартість мікротурбін становить 600–1100 \$/кВт, включаючи вартість рекуператора. При використанні біогазу питома вартість проєкту становить 1660 \$/кВт, при комбінованому виробництві електроенергії та теплоти – 2200 \$/кВт та у тригенераційному режимі – 4400 \$/кВт. При цьому витрати на монтаж та підключення мікротурбіни до мережі становлять додатково близько 30 % її вартості. Монтаж всередині вже існуючих приміщень (котельень) є кращим та значно зменшує вартість проєкту.

2.3. Газопоршнєві електростанції

Газопоршнєві двигуни (ГПД) знайшли широке використання у житлово-комунальному секторі, на промислових підприємствах, в аграрному секторі та нафтогазовій промисловості, де вони використовуються як для виробництва електроенергії, так і спільного виробництва електричної та теплової енергії, а також холоду [4]. Зазвичай діапазон потужності ГПД варіюється від кількох кіловат до 20 МВт, які можуть об'єднуватись в модульні електростанції або блок-ТЕЦ для спільного виробництва електроенергії та теплоти. Найбільш популярні на ринку ГПД потужністю 2–5 МВт і

10–20 МВт. На 1 кВт електричної потужності вони виробляють до 1 кВт теплової енергії, а питомі витрати палива при 100 % навантаженні двигуна становлять близько 10 МДж на 1 кВт·год електроенергії. Питома вартість 1 кВт потужності ГПД до 20 МВт нижча, ніж для газотурбінної установки. Однак капіталовкладення та витрати на монтаж ГПД великої та середньої потужності порівняно з ГТУ вищі в 1,3 та 1,1 раза. ГПД вимагає невеликого майданчика для розміщення, що дозволяє встановлювати їх поблизу споживача.

Електростанції на основі газопоршневих двигунів (рис. 5) [11] характеризуються високим ККД (41–45 %) і слабкою залежністю від зовнішнього навантаження, вони мають гарні маневрові якості, малий час пуску з «холодного» стану до максимального навантаження (кілька хвилин), стійкість роботи на ізольоване навантаження [1], досить високий життєвий цикл (до 300 тис. год) і великий термін до капітального ремонту (60–80 тис. год для середньообертового агрегата). ККД двигуна практично не знижується при зменшенні навантаження до 50 %, а його потужність несуттєво залежить від температури навколишнього середовища. Для роботи двигуна використовується газ низького тиску (0,010–0,035 МПа), що не вимагає застосування компресора. Для роботи двигуна використовується газ низького тиску (0,010–0,035 МПа), що не вимагає застосування компресора. При 100 % навантаженні розрахунковий час роботи газопоршневого двигуна становить 6500 год/рік, а при 85 % навантаженні – 1500 год/рік, всього робочих годин 8000 год/рік. Технічне обслуговування та простой – 760 год/рік.. Газопоршневий двигун може запускатися та зупинятися необмежену кількість разів щодня, що є перевагою для пікових та резервних установок. Газопоршнєві технології використовують рідке паливо та природний газ низького тиску, що зручно для застосування в міських умовах, а також біогаз, шахтний, звалищний та супутній газ з об'ємним вмістом метану понад 30 %.

Питома вартість газопоршневої електростанції становить від 500 до 2000 \$/кВт встановленої потужності залежно від моделі двигуна, комплектності, обсягу будівельних робіт, а термін введення в експлуатацію – 6–12 місяців. Рівень витрат при капітальному ремонті електростанції становить 70–90 % від вартості двигуна. У житлово-комунальному секторі газопоршнева станція електричною потужністю 1 МВт та тепловою потужністю 1,25 МВт може забезпечити тепловою енергією 12500 м² житлових приміщень, лікарню на 150 ліжок або виробниче приміщення площею 10000 м².

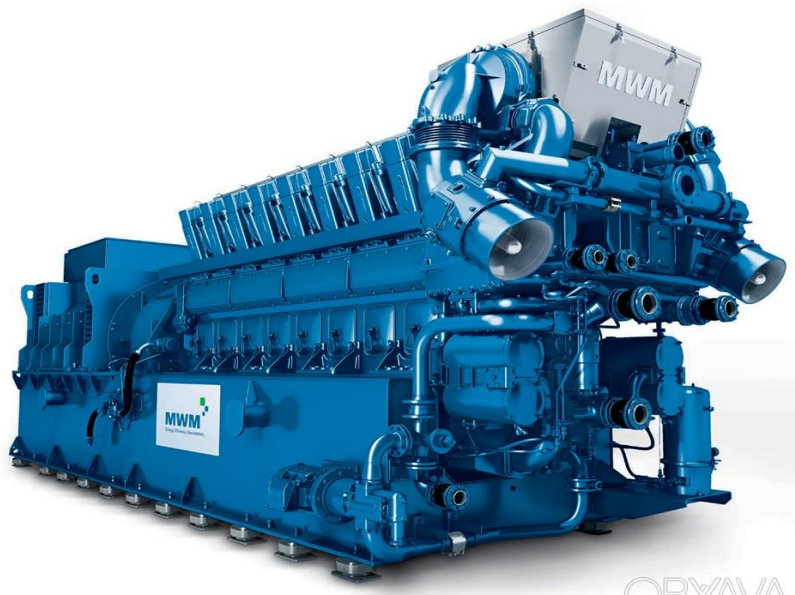


Рисунок 5. Газопоршнева установка Sumab (MWM Jenbacher). Потужність 1,5 МВт [11]

Оскільки сучасні чотиритактні газопоршнєві двигуни можуть працювати без зміни потужності при протитиску на «вихлопі» 6–9 кПа, то за двигуном можливе встановлення котла-утилізатора для систем опалення та гарячого водопостачання. Викиди шкідливих речовин при роботі на природному газі становлять 118 ppm по NO_x та 107 ppm по CO. Тому в міських умовах після двигуна необхідне встановлення дороговартісного каталітичного конвертера, який значно підвищує експлуатаційні

витрати. Для зниження шкідливих викидів можливе використання зволоженого повітря, яке подається для горіння палива [4].

Газопоршневі двигуни, що працюють на природному газі або рідкому паливі, використовуються в мобільних електростанціях морського призначення. Для цього застосовуються переобладнані старі судна та несамохідні баржі, що суттєво знижує вартість плавучих електростанцій. Вони також використовуються у пересувних електростанціях, встановлених на залізничній платформі.

Відомими виробниками ГПД є «Caterpillar» (США), «Jenbacher» (Австрія), «MAN» (Німеччина, Данія), «Wartsilla» (Фінляндія), «Mitsubishi» (Японія), «Rolls-Royce» (Англія), «Первомайськдизельмаши» (Україна). Українське підприємство спеціалізується на випуску середньообертових газопоршневих двигунів електричною потужністю 315–750 кВт із виробництвом теплової енергії до 1065 кВт/год. Українське підприємство «Завод ім. В.О. Малишева» (м. Харків) 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 %.

2.4. Інші технології

Для вирішення проблем децентралізованої енергетики використовуються інші технології. Отримують розвиток міні-ТЕЦ на базі опалювальних котелень, газові та парові турбіни на основі біомаси, теплові насоси, паливні елементи (1–20 кВт) з ККД понад 60 % по виробництву електроенергії, двигуни Стірлінга, парогазові електростанції з газопоршневими двигунами [4]. Великий інтерес становить використання повітряних газових турбін [12], малих модульних реакторів [13], енергії підземних газових сховищ та регазифікації зрідженого газу, накопичувачів теплової та електричної енергії [14, 15], теплових насосів [16]. Розвиватиметься виробництво альтернативних видів палива. До кінця 2024 р. в Україні планується запустити 7 біометанових заводів, причому два заводи вже виробляють зріджений біометан. Очікувана продуктивність біометанових заводів в Україні становить 111 млн м³ метану на рік.

Відновлювана енергетика є важливим компонентом у системі децентралізованої енергетики. Євросоюз ставить завдання збільшити втричі потужність відновлюваної енергетики до 2030 р. Сьогодні в енергетиці ЄС вітрова енергетика лідирує за виробництвом електроенергії, вона досягла 225 ГВт і вже випередила використання викопного палива. До 2030 року Євросоюз збільшить потужність вітрових електростанцій на 350 ГВт (звіт *WindEurope*, осінь 2024 р.). Встановлена потужність фотоелектричних установок у світі майже в 5 разів перевищила потужність світової ядерної енергетики (доповідь *WNISR-2024*, Франція). Сучасний стан та перспективи розвитку сонячної енергетики в Україні розглянуто в роботі [17].

Відповідно до Національного плану України в галузі відновлюваної енергетики до 2030 р. частка відновлюваних джерел енергії у генеруванні електроенергії становитиме близько 30 %. Найближчими роками за участю компанії *GOLDBECK SOLAR Investment GmbH* (Німеччина) потужність сонячної енергетики в Україні може збільшитись на 500 МВт. Водночас аналіз Міжнародного енергетичного агентства показує, що Україна має більш високий потенціал сонячної енергетики, що дозволяє збільшити в 5 разів її потужність порівняно із запланованою. Сьогодні сукупна встановлена потужність сонячних ферм в Україні становить 7,3 ГВт, або близько 90 % загальної потужності відновлюваної енергетики, а вітрової енергетики – 1,9 ГВт (71 % на тимчасово окупованій території). У 2020–24 рр. в Україні введено в експлуатацію 238 МВт потужності вітрової енергетики, планується створення вітрових електричних станцій у Полтавській області, а також навколо Чорнобильської АЕС. Основним напрямом розвитку сонячної та вітрової енергетики залишається зниження собівартості виробництва електроенергії, яка сьогодні у 5–7 разів вища, ніж на атомних станціях [4].

3. Висновки

Як показав аналіз, газотурбінні та газопоршневі технології мають великий потенціал для використання у децентралізованій енергетиці України. Вони характеризуються високою маневреністю,

малим часом виходу на максимальний режим, прийнятною потужністю при роботі на часткових режимах, можуть використовуватися для одночасного виробництва електроенергії, теплоти і холоду. Газотурбінні та газопоршневі технології використовують різні види палива, у тому числі місцеві, мають досить високий ККД і допустимі характеристики шуму та вібрацій, добре пристосовані для роботи в міській інфраструктурі та сільській місцевості, в тому числі за екологічними характеристиками. За потреби вони можуть встановлюватись на морських суднах та залізничних платформах для подачі електроенергії у районах з відсутністю виробництва електроенергії. Великою перевагою є блочно-модульне виконання електростанцій у заводських умовах, введення в експлуатацію протягом 6–12 місяців після постачання обладнання.

В Україні вже введено в експлуатацію близько 100 МВт розподіленої газової генерації [18] та до кінця 2024 р. планується збільшення потужності до 1 ГВт. Для реалізації цієї програми будуть залучені приватні компанії та підприємства державної форми власності. Для цього в Україні створено відповідні інвестиційні умови та максимально спрощені дозвільні процедури для обладнання, яке надходить до країни. Особливо важливим є сьогодні розвиток власної генерації для промислових підприємств, що дозволить знизити навантаження на енергетичну систему країни та уникнути зупинки виробничих процесів через можливі відключення електроенергії. У цьому напрямі важливу роль відіграє взаємодія місцевих громад і бізнесу з донорами та міжнародними партнерами. Приклади успішного міжнародного партнерства є у низці областей України (Житомир, Тернопіль).

На Міжнародній конференції з відновлення України (Берлін, червень 2024 р.) [19] було підписано 12 угод з партнерами з розвитку і відновлення генерації та мереж України. Серед них – меморандум із *Siemens Energy AG* (Німеччина) у галузі децентралізованого виробництва енергії. З квітня 2022 р. країни G7 та партнери надають підтримку Україні через Фонд підтримки енергетики [20]. З березня 2024 р. у вигляді грантів виділено вже близько 200 млн євро. США виділили понад 730 млн доларів на відновлення енергетики. Європейський банк реконструкції та розвитку планує передати 300 млн євро на відновлення генеруючих потужностей та будівництво децентралізованої енергетики. Німеччина виділила 70 млн євро на купівлю необхідного обладнання, планується збільшення імпорту електроенергії з Європи в зимовий період 2024–25 рр. з 1,7 до 2 ГВт. Для відновлення енергетики в Україну відправлено близько 10 000 електрогенераторів та трансформаторів, у Європі створюється значний запас дизельного палива для використання в Україні у зимовий період 2024–25 рр.

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.

Посилання

1. Кулик М.М., Горбулін В.П., Кириленко О.В. Концептуальні підходи до розвитку енергетики України (аналітичні матеріали). Київ: Інститут загальної енергетики НАН України, 2017. 78 с. ISBN 978-966-02-8281-0.
2. Ковалко О.М., Ковалко Н.М., Євтухова Т.О., Новосельцев О.В. Комунальна теплоенергетика: енергоефективність, структура управління, енергосервісні послуги. Зібрання творів під заг. ред. чл.-кор. НАН України О.В. Новосельцева. Київ: Інститут загальної енергетики НАН України, 2023. 720 с. ISBN 978-966-02-9489-9.
3. Костенко Г., Згуровець О. Сучасний стан та перспективи розвитку відновлюваної розподіленої генерації в Україні. *Системні дослідження в енергетиці*. 2023. № 2(73). С. 4–17. <https://doi.org/10.15407/srenergy2023.02.004>
4. Маляренко В.А., Шубенко О.Л., Андрєєв С.Ю., Бабак М.Ю., Сенецький О.В. Когенераційні технології в малій енергетиці. Харків: ХНУМГ ім. О.М. Бекетова, 2018. 454 с.
5. Gas turbine «Siemens SGT800». URL: <https://dm.energy/gazovye-turbiny/siemens/sgt-600> (Last accessed: 29.10.2024).
6. Халатов А.А., Кулішов С.Б., Чобенко В.Н., Раїмов Р.І. Використання газотурбінних технологій – ключ до енергетичної безпеки України. *Промислова електроенергетика та електротехніка*. 2020. №3(123). С. 10–16. URL: <https://promelektro.com.ua/archive.html>
7. Microturbines. URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/Microturbine> (Last accessed: 29.10.2024).

8. Microturbines: Power to People. The Capstone Turbine Interview. URL: https://www.distributedenergy.com/de_0411_microturbines.html (Last accessed: 29.10.2024).
9. Vick V., Young T., Kelly M., Tuttle S., Hinnant K. A Simple Recuperated Ceramic Microturbine: Design, Concept, Cycle Analysis, and Recuperator Component Prototype Tests. *Proceedings of ASME Turbo Expo 2016: Turbomachinery Technical Conference and Exposition*. Paper № GT2016-57780. 2016. V008T23A030. 14 p. <https://doi.org/10.1115/GT2016-57780>
10. Stupak O., Khalatov A., Donyk T., Shikhabutinova O. A study of new local heating and air conditioning schemes based on the Maisotsenko cycle. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. Vol. 3. No. 8. P. 6–14. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.205047>
11. Obyava.ua. URL: <https://obyava.ua/ru/gazoporshnevaya-elektrostantsiya-sumab-mwm-jenbacher-1500-kvt-5170535.html> (дата звернення: 18.10.2024).
12. Русанов А., Костіков А., Федорейко В., Кардаш Д., Тарасова В., Ганжа М., Кузнецов М. Підвищення енергоефективності та економічності когенераційної енергоустановки з повітряною турбіною. *Системні дослідження в енергетиці*. 2023. № 4(75). С. 4–16. <https://doi.org/10.15407/srenergy2023.04.004>
13. Нечаєва Т., Лещенко І. Перспективи впровадження малих модульних реакторів в енергосистемі України. *Системні дослідження в енергетиці*. 2023. №3(74). С. 39–49. <https://doi.org/10.15407/srenergy2023.03.039>
14. Дерій В., Згуровець О. Акумулятори теплової енергії. *Системні дослідження в енергетиці*. 2023. №3(74). С. 4–14. <https://doi.org/10.15407/srenergy2023.03.004>
15. Дерій В. Накопичувачі електричної енергії. *Системні дослідження в енергетиці*. 2023. № 1(72). С. 12–24. <https://doi.org/10.15407/srenergy2023.01.012>
16. Дерій В., Тесленко О., Соколовська І. Фінансові перешкоди впровадженню теплових насосів у централізованому теплопостачанні. *Системні дослідження в енергетиці*. 2024. №3(79). С. 4–12. <https://doi.org/10.15407/srenergy2024.03.004>
17. Sverdlova A. Review of the current state and development perspectives of the solar energy in Ukraine. *System Research in Energy*. 2022. No. 1(70). P. 19–28. <https://doi.org/10.15407/srenergy2022.01.019>
18. В Україні вже підключили до мережі 100 МВт газової генерації, до кінця року очікується підключення ще 200 МВт. URL: <https://www.ukrinform.ua/rubric-economy/3909822-v-ukraini-vze-pidcluchili-do-merezi-100-mvt-gazovoi-generacii-expert.html> (дата звернення: 18.10.2024).
19. UNN. URL: <https://unn.ua/ru/news/ukraina-na-konferentsii-po-vosstanovleniyu-podpisala-12-soglashenii-po-energetike> (дата звернення: 18.10.2024).
20. Finance.ua. URL: <https://news.finance.ua/ru/podgotovka-ukrainy-k-zime-kakyyu-pomoshh-obechnali-soyuzniki-dlya-vosstanovleniya-energetiki> (дата звернення: 09.10.2024).

References

1. Kulik, M.M., Gorbulin, V.P., & Kirilenko, O.V. (2017). *Conceptual approach to development of energy sector of Ukraine* [Analytical materials]. General Energy Institute of NAS of Ukraine, Kyiv (78 p.) [in Ukrainian].
2. Kovalko, O.M., Kovalko, N.M., Evtukhova, T.O., & Novoseltsev, O.V. (2023). *The municipal thermal power engineering, management structure, energy services* [Collection of work]. In O.V. Novoseltsev (Ed.), General Energy Institute of NAS of Ukraine, Kyiv (720 p.) [in Ukrainian].
3. Kostenko, G., & Zgurovets, O. (2023). Current State and Prospects for Development of Renewable Distributed Generation in Ukraine. *System Research in Energy*, 2(73), 4–17 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.15407/srenergy2023.02.004>
4. Malyarenko, V.A., Shubenko, A.L., Andreev, S.Yu., Babak, M.Yu., & Senetskiy, O.V. (2018). *Cogeneration technologies in small energy systems*. O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv (Publisher) (454 p.) [in Ukrainian].
5. Gas turbine «Siemens SGT800». Retrieved October 29, 2024, from <https://dm.energy/gazovye-turbiny/siemens/sgt-600>
6. Khalatov, A.A., Kulishov, S.B., Chobenko, V.M., & Raimov, R.I. (2020). Application of gas turbine technologies is the key to energy security of Ukraine. *Industrial Electric Power and Electrical Engineering*, 3(123), 10–16. <https://promelektro.com.ua/archive.html> [in Ukrainian].
7. Microturbines. Retrieved October 29, 2024, from <https://en.wikipedia.org/wiki/Microturbine>
8. Microturbines: Power to People. The Capstone Turbine Interview. Retrieved October 29, 2024, from https://www.distributedenergy.com/de_0411_microturbines.html
9. Vick, V., Young, T., Kelly, M., Tuttle, S., & Hinnant, K. (2016). A Simple Recuperated Ceramic Microturbine: Design, Concept, Cycle Analysis, and Recuperator Component Prototype Tests. *Proceedings of ASME Turbo Expo 2016: Turbomachinery Technical Conference and Exposition*. Paper № GT2016-57780, V008T23A030 (14 p.). <https://doi.org/10.1115/GT2016-57780>
10. Stupak, O., Khalatov, A., Donyk, T., & Shikhabutinova, O. (2019). A study of new local heating and air conditioning schemes based on the Maisotsenko cycle. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3(8), 6–14. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.205047>

11. Obyava.ua. Retrieved October 18, 2024, from <https://obyava.ua/ru/gazoporshnevaya-elektrostanciya-sumab-mwm-jenbacher-1500-kvt-5170535.html> [in Ukrainian].
12. Rusanov, A., Kostikov, A., Phedoreiko, V., Kardash, D., Tarasova, V., & Ganzha, M. (2023). Increasing the efficiency and economy of a cogeneration power plant with an air turbine. *System Research in Energy*, 4(75), 4–16 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.15407/srenergy2023.04.004>
13. Nechaeva, T., & Leschenko, I. (2023). Prospects of Implementation of Small Modular Reactors in the Power System of Ukraine. *System Research in Energy*, 3(74), 39–49 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.15407/srenergy2023.03.039>
14. Deriy, V., & Zgurovets, O. (2023). Heat energy storages. *System Research in Energy*, 3(74), 4–14 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.15407/srenergy2023.03.004>
15. Deriy, V. (2023). Electric energy storages. *System Research in Energy*, 1(72), 12–24 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.15407/srenergy2023.01.012>
16. Derii, V., Teslenko, O., & Sokolovska, I. (2024). Financial Obstacles to the Implementation of Heat Pumps in District Heating. *System Research in Energy*, 3(79), 4–12 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.15407/srenergy2024.03.004>
17. Sverdlova, A. (2022). Review of the current state and development perspectives of the solar energy in Ukraine. *System Research in Energy*, 1(70), 19–28. <https://doi.org/10.15407/srenergy2022.01.019>
18. Ukraine has already been connected to the network up to 100 MWt of gas generation, another 200 MWt will be connected up to the year end. Retrieved October 18, 2024, from [https://www.ukrinform.ua/rubric-economy/3909822-v-ukraini-vze-pidcluchili-do-merezi-100-mvt-gazovoi-generaci\]-expert.html](https://www.ukrinform.ua/rubric-economy/3909822-v-ukraini-vze-pidcluchili-do-merezi-100-mvt-gazovoi-generaci]-expert.html) [in Ukrainian].
19. UNN. Retrieved October 18, 2024, from <https://unn.ua/ru/news/ukraina-na-konferentsii-po-vosstanovleniyu-podpisala-12-soglashenii-po-energetike> [in Ukrainian].
20. Finance.ua. Retrieved October 9, 2024, from <https://news.finance.ua/ru/podgotovka-ukrainy-k-zime-kakuyu-pomoshh-obeshhali-soyuzniki-dlya-vosstanovleniya-energetiki> [in Ukrainian].

GAS TURBINE AND GAS PISTON POWER PLANTS FOR DISTRIBUTED ENERGY SECTOR OF UKRAINE

Artem Khalatov^{1,2*}, Dr. Sci. (Engin.), Professor, <https://orcid.org/0000-0002-7659-4234>

Nataliia Fialko^{1,2}, Dr. Sci. (Engin.), Professor, <https://orcid.org/0000-0003-0116-7673>

¹Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine, 2a, Marii Kapnist St., Kyiv, 03680, Ukraine;

²General Energy Institute of NAS of Ukraine, 172, Antonovicha St., Kyiv, 03150, Ukraine

*Corresponding author: Artem.Khalatov1942@gmail.com

Abstract. *In this paper the analysis of gas-turbine and gas-piston power plants widely employed for the electricity, heat and cold production is given. Currently a wide range of gas turbines are produced worldwide with power of 200–300 MW in the simple cycle (efficiency is 35–40 %) and up to 600 MW in the combined cycle (efficiency is 60 % and over). The micro-turbine is the class of low-power gas turbines (10–400 kW) for the electricity, heat and cold production having the efficiency of 15–19 % in the simple cycle and 25–28 % in the combined cycle. If necessary, they unite into clusters. The range of electrical power of gas-piston electrical power plants is from a few kW up to 20 MW, they form modular power stations and block stations for the heat and electricity production. In the near future these technologies will be basis of distributed energy configuration of Ukraine. This will increase its stability and reliability, as well as ability to operate in an uninterrupted mode in the war- and post-war conditions. They demonstrate a few positive features, such as a high electrical efficiency, relatively low noise and vibrations during operation the wide power range, low power loss, economical operation in partial modes, serial production and developed service, using of different fuels. The electrical efficiency of gas-piston machines is 3–10 % greater, however the fuel efficiency of gas turbine on co-generation mode is close to the gas-piston machine. The gas-turbine and gas-piston power stations can be widely employed in the urban and rural areas, in industrial enterprises, oil and gas fields, as well as on coastal vessels and railway platforms to supply electricity in the regions, where there is no electricity or where their construction is not economically feasible. The ecological characteristics including gas-piston power plants meet the requirements for emissions of harmful products into the atmosphere, if necessary they can be reduced via installation of the catalytic systems at the exit. The gas-turbine and gas-piston power stations of low and medium power are supplied in a block-contained design and put into operation within 6–12 months.*

Keywords: gas turbine, micro-turbine, gas-piston machine, distributed energy.

Надійшла до редколегії: 20.11.2024