

УДК 620.9

Валентина Станиціна^{1,2,3*}, канд. техн. наук, ст. досл., <https://orcid.org/0000-0002-1005-6185>

Тетяна Нечаєва^{1,2,3}, канд. техн. наук, ст. досл., <https://orcid.org/0000-0001-9154-4545>

Віктор Троханяк², канд. техн. наук, доцент, <https://orcid.org/0000-0002-8084-1568>

Віталій Горський^{1,2}, докт. філософії, <https://orcid.org/0000-0001-9128-9556>

Олександр Тесленко^{1,2}, канд. техн. наук, ст. досл., <https://orcid.org/0000-0002-3772-5991>

¹Інститут загальної енергетики НАН України, вул. Антоновича, 172, м. Київ, 03150, Україна;

²Національний університет біоресурсів і природокористування України, вул. Героїв Оборони, 15, м. Київ, 03041, Україна;

³ДУ «Центр оцінювання діяльності наукових установ та наукового забезпечення розвитку регіонів України Національної академії наук України», вул. Володимирська, 54, м. Київ, 01601, Україна

*Автор-кореспондент: st_v_v@hotmail.com

ТЕХНОЛОГІЇ ЕЛЕКТРОГЕНЕРАЦІЇ ТА ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ НЕЗАЛЕЖНОСТІ ОКРЕМИХ ТЕРИТОРІАЛЬНИХ ГРОМАД

Анотація. Російські атаки на енергосистему України, які призводили до знеструмлення цілих міст та припинення централізованого теплопостачання, підкреслили ризики та недоліки залежності від великомасштабного централізованого енергопостачання для громад. В цьому контексті важливо розглядати розвиток енергозабезпечення громад в напрямку їх енергонезалежності. Метою статті є формування переліку технологій електрогенерації та теплопостачання для підвищення енергетичної незалежності окремих територіальних громад, доцільних для впровадження в Україні. В статті розглядаються критерії для аналізу та вибору технологій розподіленої електрогенерації та теплопостачання: сонячні та вітрові електростанції, газопоршнєві та газотурбінні установки, генератори, акумулятори, ко- та тригенераційні установки, біопаливні електростанції та теплогенеруючі котли, теплові насоси та електрокотли; виконано їх групування за сформованими критеріями. Розглянуті технології сприяють зменшенню зовнішнього постачання енергоресурсів громадам та зниженню втрат під час передачі та розподілу електроенергії. Технології, які використовують відновлювані джерела енергії та місцеві палива, доцільні до впровадження у громадах відповідно до наявності достатніх обсягів ресурсів, проте в більшості випадків вони не в змозі повністю забезпечити громади електричною та тепловою енергією у зв'язку з недостатньою кількістю зазначених ресурсів та високою вартістю обладнання, наприклад такого як акумулятори та теплові насоси. Рішення щодо впровадження конкретної технології розподіленої генерації мають прийматись після ретельного аналізу умов та можливостей енергозабезпечення кожної окремої громади. Ця стаття спрямована на обговорення можливостей підвищення енергетичної незалежності та забезпечення надійності енергозабезпечення територіальних громад в Україні.

Ключові слова: електрогенерація, теплопостачання, розподілена генерація, відновлювані джерела енергії, когенерація, біопалива, теплові насоси.

1. Вступ

Російські обстріли енергетичної інфраструктури України продемонстрували ризики та недоліки значної залежності від великомасштабного зовнішнього централізованого енергопостачання для громад. Паралельно з відновленням після обстрілів низка громад провела у себе заходи, спрямовані на реформування систем опалення, генерації електроенергії, її зберігання та загалом для досягнення енергонезалежності громади. Ці події наочно показали, що сьогодні для країни актуальним є впровадження технологій та заходів, які підвищують енергетичну безпеку та сприятимуть енергетичній

незалежності громад.

Основними напрямками досягнення енергетичної незалежності громад є збільшення виробництва електро- та теплоенергії з місцевих видів паливно-енергетичних ресурсів (ПЕР), переважно відновлюваних джерел енергії (ВДЕ); впровадження енергозберігаючих заходів та більш енергоефективних технологій виробництва електро- та теплоенергії; впровадження енергозберігаючих заходів у місцевих виробництвах продукції, наданні послуг, у домогосподарствах, комунальних та бюджетних установах. У статті розглядаються лише напрями, пов'язані з енергозабезпеченням громад.

Останнім часом набули поширення дослідження окремих аспектів енергонезалежності громад та резильєнтності енергосистем. Роль та функції мікромереж з ВДЕ-генерацією у підвищенні резильєнтності енергетичних систем була проаналізована у [1]. Виявлено, що локальні мікромережі володіють значним потенціалом підвищення резильєнтності енергосистеми та можуть зменшити залежність від магістральних ліній енергопередачі. Стаття [2] присвячена підвищенню ефективності використання відновлюваної енергії в полігенерації Microgrid як об'єднаної системи енергопостачання локальних об'єктів на ВДЕ. Запропонований у статті підхід дозволить отримати максимальну частку ВДЕ в енергетичному балансі мікромережі та підвищити її ефективність. Аналіз розподілених енергетичних систем та висвітлення ключових характеристик енергетичних технологій, які зараз використовуються для розподіленої генерації (РГ), виконано у [3]. Автори [4] вважають, що розподілена відновлювана енергія є найбільш багатообіцяючою моделлю забезпечення сталої енергії для всіх, наводять переваги використання невеликих сонячних та вітрових генеруючих установок, структури та типи розподіленої / децентралізованої системи відновлюваної енергії та потенційні перешкоди їх впровадженню. В роботі [5] досліджено автономні схеми постачання електроенергії позамеревими гібридними системами з ВДЕ, виконано техніко-економічне порівняння між розгортанням сонячних систем в кожному будинку та постачанням електроенергії від централізованої гібридної мікромережі. Розгляд того, як зміна ландшафтних факторів і пов'язаних з ними можливостей у найближчі десятиліття впливатимуть на перехід до децентралізованої енергетичної системи виконано у [6]. В цій роботі стверджується, що перехід від великомасштабних централізованих енергетичних систем до середніх і малих розподілених систем швидше за все призведе до заміни багатьох поточних практик і моделей у всьому секторі, фактично створивши абсолютно нову енергетичну парадигму. Впровадження та розвиток локальних енергетичних систем сприяє зменшенню втрат при передачі електро- та теплоенергії. В роботі [7] розглянуто діагностування теплової мережі кількісними методами визначення фактичних питомих тепловтрат та якісними методами діагностики основних дефектів трубопроводів.

Метою статті є формування переліку технологій електрогенерації та теплопостачання для підвищення енергетичної незалежності окремих територіальних громад, доцільних для впровадження в Україні.

2. Методи та матеріали

Літературний огляд: проведено аналіз наукових публікацій та інформації з інтернет-ресурсів щодо різних технологій електро- та теплопостачання для розподіленої генерації. Цей огляд дав можливість зібрати і систематизувати інформацію про сонячні та вітрові електростанції, газопоршневі та газотурбінні установки, генератори, акумулятори, ко- та тригенераційні установки, установки на біомасі та технології перетворення і зберігання енергії такі як теплові насоси та електрокотли.

Аналіз переваг та недоліків: проведено аналіз кожної з вищезазначених технологій з точки зору їхньої вартості обладнання, енергетичної ефективності, простоти монтажу та обслуговування. Цей аналіз дав змогу визначити переваги та недоліки кожної технології.

Систематизація наведеної інформації.

Для аналізу та вибору технологій розподіленої електрогенерації та теплогенерації сформовано наступні критерії:

1. Скорочення зовнішнього постачання енергоресурсів для забезпечення енергетичної незалежності громад;
2. Використання місцевих паливно-енергетичних ресурсів;
3. Використання відновлюваних джерел енергії;
4. Економічна ефективність (капіталовкладення, вартість паливно-енергетичних ресурсів, собівартість електро- та теплоенергії, термін окупності, наявність механізмів підтримки);
5. Екологічна ефективність (заміщення використання викопного палива, екологічні обмеження, безвуглецеві та низьковуглецеві технології, зменшення викидів, скидів, утворення твердих відходів);
6. Енергетична ефективність (підвищення ефективності використання енергоресурсів, використання вторинних енергоресурсів);
7. Швидкість монтажу.

3. Результати

Технології розподіленої генерації електроенергії та використання місцевих видів палив.

Розподілені енергетичні системи призначені для виробництва електроенергії в безпосередній близькості від локальних споживачів з урахуванням їх обсягів та добових і сезонних профілей споживання. До розподіленої генерації належать локальні джерела електричної енергії, приєднані до розподільчої електричної мережі безпосередньо або з боку споживачів, в поєднанні з засобами зберігання та перетворення енергії.

Перевагами використання локальних джерел енергії є їх розміщення на невеликій відстані від споживача, що забезпечує зниження втрат електроенергії в мережах при її передачі, зменшення залежності від централізованого енергопостачання. Розосередженість джерел розподіленої генерації та можливість їх взаємного резервування є важливим фактором підвищення енергетичної безпеки, оскільки знижує ризики втрати енергопостачання, сприяє його швидкому відновленню, а в умовах воєнного стану зменшує вразливість при масованих ракетних атаках. Більшість технологій, що використовуються для установок РГ, засновані на прямому спалюванні твердого палива (вугілля, біомаси, твердих побутових відходів), природного газу (газотурбінні, газопоршневі та парогазові установки), а також установки на ВДЕ (малі сонячні, вітрові, гідроелектростанції, а також гібридні установки, що поєднують різні типи технологій на ВДЕ, а також акумуляційні системи накопичення енергії).

Серед нових локальних потужностей у світі значну частку становить мікрогенерація на основі ВДЕ (перш за все, дахові сонячні панелі, в тому числі в комбінації з накопичувачами енергії) і порівняно більш екологічно ефективні мінікогенераційні установки, що сприяє скороченню викидів парникових газів.

В країнах ЄС частка РГ генерації становить в середньому близько 10 % від загального обсягу виробництва електроенергії, найвищий показник – у Данії 50 % [8]. З 2019 по 2021 рік у світі додано 167 ГВт розподіленої фотоелектричної енергії [9].

Ключовими директивами Четвертого енергетичного пакету ЄС «Чиста енергія для усіх європейців» щодо стимулювання розвитку РГ в ЄС є Директива ЄС 2018/2001 щодо просування використання енергії з ВДЕ та Директива ЄС 2019/944 стосовно спільних правил внутрішнього ринку електроенергії. У вітчизняному законодавстві розподілену генерацію визначено в Законі «Про ринок електричної енергії» від 13.04.2017 № 2019-VIII як електростанцію встановленою потужністю до 20 МВт, що приєднана до системи розподілу електричної енергії. Законом визначено спрямованість державної політики в електроенергетиці на сприяння виробництву електроенергії з альтернативних джерел енергії та розвитку РГ і обладнання для зберігання енергії. Дозвіл споживачам електричної енергії (як побутовим, так і не побутовим) щодо продажу надлишку електроенергії власної генерації

(генеруючою установкою та/або установкою зберігання енергії) за вільним договором та за договірною ціною було надано Постановою НКРЕКП щодо змін до Правил роздрібного ринку електричної енергії від 09 травня 2023 р. № 847.

Дослідження вітчизняного сегмента виробників електроенергії з установок на ВДЕ потужністю до 1 МВт [10] показало, що станом на червень 2020 р. перше місце за встановленою потужністю посідали фотовольтаїчні сонячні електростанції, потім слідували гідроелектростанції, біогазові станції, ВЕС та станції на біомасі. За регіональним розподілом встановлених потужностей найбільше малої ВДЕ-генерації було підключено у Вінницькій, Хмельницькій, Івано-Франківській, Київській і Закарпатській областях. У 2021 р. було встановлено майже 15 тисяч сонячних установок домогосподарств (*дСЕС*) загальною потужністю 426 МВт, половина з яких – у Дніпропетровській та Закарпатській області, які є лідерами за їх кількістю. Загалом на кінець 2021 року в Україні нараховувалося близько 45 тисяч *дСЕС* загальною потужністю 1,2 ГВт [11].

Глобальна середньозважена собівартість електроенергії у нових проєктах сонячних фотоелектричних установок скоротилася з 2010 року на 89 % з 0,445 до 0,049 дол. США/кВт·год у 2022 році, що зумовлене в основному падінням цін на фотоелектричні модулі приблизно на 90 % у період з грудня 2009 року по грудень 2022 року, яке, у свою чергу, зумовлене підвищенням їх ефективності, економією на масштабах виробництва та вертикальною інтеграцією в ланцюзі поставок, оптимізацією виробництва та зниженням матеріалоемності. У грудні 2022 року вартість модулів становила 0,22–0,44 дол. США/Вт [12].

На будівництво 1 МВт *СЕС* в Україні потрібно 600–700 тис. євро та щонайменше 2 гектари земельної площі [13]. Термін експлуатації залежить від строку служби інвертора – до 25 років та панелей – не менше 25–30 років, а деградація панелей становить не більше 0,7–0,8 % на рік. Мінімальний ступінь деградації характерний для монокристалічних модулів, а також тонкоплівкових сучасних гібридів. Станом на лютий 2022 року середньоринкова питома вартість будівництва 1 кВт *СЕС* в Україні у компаній-інстальаторів складала в середньому 800 дол. США, а загальні витрати на *дСЕС* потужністю 30 кВт складають 20–27 тис. дол. США [14].

Зниження глобальної середньозваженої собівартості електроенергії наземних *ВЕС* у 2010–2021 рр. з 0,107 до 0,033 дол. США/кВт·год зумовлене зниженням вартості вітрових турбін і збільшенням коефіцієнта використання потужності завдяки вдосконаленню технології турбін [12]. Сучасні установки *ВЕС* генерують енергію при швидкості вітру від 3–4 м/с. На будівництво 1 МВт *ВЕС* в Україні потрібно 1150–1250 тис. євро без ПДВ та 0,2–0,3 гектари земельної площі. Проєкти *ВЕС* більш складні з точки зору девелопменту, вимагають більш тривалої і складної підготовки. Розрахунковий термін служби сучасних *ВЕС* становить 25 років. Як правило, протягом всього терміну служби вітрогенератор як мінімум 2–3 рази потребуватиме капітального ремонту, вартість якого може досягати собівартості всієї установки [13].

Газопоршневі установки доступні в електричних потужностях від кількох кіловат до приблизно 5 МВт, коштують приблизно так само, як дизельні та двопаливні генераторні установки – близько 825 дол. США/кВт, характеризуються швидким набором потужності та мають найменший потенціал викидів серед усіх типів поршневих двигунів [15].

Газотурбінні установки спалюють газ або рідке паливо і підходять для використання у режимі пікового навантаження і регулювання навантаженням у відповідності до змін споживання, хоча порівняно з газопоршневими двигунами вони потребують декілька хвилин для набору швидкості. Доступні в потужностях від приблизно 300 кВт до кількох сотень мегават, а питома вартість коливається від 910 дол. США/кВт до 1400 дол. США/кВт встановленої потужності [15].

Ключовими технічними особливостями роботи газотурбінних / газопоршневих установок (*ГТУ / ГПУ*) є висока маневрова здатність при ККД не менше 30 %–35 %, швидкий монтаж за рахунок модульної конструкції та порівняно велика собівартість виробленої електроенергії. Вони можуть використовуватись як резервні джерела для генерації з ВДЕ та як пікова генерація. Їх використання у базовому режимі є недоцільним [16].

Дизель-генераторні установки виробляються в широкому діапазоні розмірів, приблизно від 1 кВт до 10 МВт, і є однією з найменш капіталоємних технологій РГ з питомими капіталовкладеннями 810 дол. США/кВт встановленої потужності. Основними недоліками цієї технології є дуже високі рівні викидів, а також гучний шум двигуна, що потребує шумопридушення [15]. Значно менші обсяги викидів мають двопаливні генераторні установки на суміші природного газу та дизельного палива (зазвичай від 5 до 10 % дизельного палива за об'ємом). У більшості інших аспектів вартості та експлуатації двопаливні двигуни можна порівняти з дизельними. Вони також доступні в розмірах від кількох кіловат до приблизно 10 МВт зі встановленою вартістю приблизно 875 дол. США/кВт.

Технології РГ зі спалюванням викопного палива мають ті самі типи негативного впливу на довкілля, як великі електростанції, що працюють на викопному паливі, наприклад, забруднення повітря. Ці впливи можуть бути меншими за масштабом, але водночас їх дія буде ближча до населених пунктів. Деякі технології РГ зі спалюванням відходів, біомаси та комбінованого виробництва тепла та електроенергії мають потребу у воді для виробництва пари або охолодження. Ефективність технологій РГ на викопному паливі може бути меншою порівняно з централізованою електростанцією великої потужності внаслідок масштабу виробництва [17].

Акумуляуючі пристрої отримують енергію з електричної мережі або іншого джерела (наприклад, відновлюваної РГ) і зберігають її, роблячи доступною за потреби. Найпоширенішою формою зберігання електроенергії є акумуляційні батареї. Вартість придбання та встановлення систем накопичення енергії може коливатися від 1100 дол. США/кВт до 1300 дол. США/кВт [15].

Міні-ГЕС є екологічно чистою технологією виробництва електроенергії на ВДЕ, але їх використання обмежене наявністю та доступністю водних ресурсів.

Використання біопалив для електро- та теплогенерації. В Україні у 2020 р. біомаса замістила біля 5,2 млрд м³ природного газу. Зі всієї енергії, що виробляється з біопалив в Україні, приблизно 70 % отримують з твердої біомаси шляхом її спалювання, приблизно по 15 % – з біогазу та рідких біопалив типу біодизеля і біоетанолу. Найбільший ресурс на рівні 40 % від теоретичного потенціалу біомаси припадає на різні залишки сільськогосподарського виробництва. Використання біомаси може реалізовуватись шляхом: прямого спалювання в котлах; отримання біогазу як продукту ферментації біомаси; збору, очищення і спалювання звалищного газу; газифікації твердої біомаси з метою отримання газогенераторного газу [18, 19]. За наявності доступної недорогої сировини – наприклад, місцевих побічних сільськогосподарських продуктів або відходів деревообробки вони можуть забезпечити висококонкурентну диспетчеризовану електроенергію. Найбільш вигідними є проєкти, у яких в якості палива використовуються відходи власного виробництва, наприклад, спалювання лущиння соняшника у котельні олійноекстракційного заводу, або використання відходів деревини для ТЕЦ на деревообробному підприємстві [12, 20].

У період 2010–2022 рр. глобальна середньозважена собівартість електроенергії біоенергетичних проєктів знизилася з 0,082 до 0,061 дол. США/кВт·год. Середньозважені капітальні витрати нових біоенергетичних установок в Європі потужністю до 20 МВт у 2022 р. були в діапазоні 3000–5000 дол. США/кВт [12]. Когенераційні установки на біомасі мають вищі капітальні витрати, проте у них вища загальна енергоефективність (близько 80–85 %) і вони можуть виробляти теплоенергію для опалення приміщень та/або пару для промислових процесів, забезпечувати гаряче водопостачання. Орієнтовні питомі капітальні витрати для установок прямого спалювання для виробництва тільки теплоенергії – 80–150 євро/кВт встановленої теплової потужності [19]. В Україні є виробники біопаливних котлів для тепlopостачання потужністю від 15 кВт до декількох МВт, вартість яких співставна з вартістю газових котлів.

Законом України «Про альтернативні джерела енергії» передбачений «зелений» тариф для виробництва електричної енергії з біомаси та біогазу.

В розвинених країнах світу при спалюванні біопалив не стягується податок за викиди CO₂, оскільки цей вид енергоресурсу вважається вуглецевонейтральним, в Україні ж стягується, що значно

збільшує розмір екологічного податку. У Верховній Раді зареєстровано законопроект, яким передбачається встановлення нульової ставки податку за викиди CO₂ при спалюванні біопалив, що стимулюватиме їх використання [21].

Основними перевагами біопалива є те, що воно є відновлюваним та вважається CO₂-нейтральним видом палива, у випадку використання біогазу відбувається утилізація небезпечних відходів з полігонів твердих побутових відходів. Проте для спалювання потрібно використовувати пальники, розраховані на його особливості, викиди забруднюючих речовин при спалюванні біопалив вищі, ніж при спалюванні природного газу, також можуть утворюватись токсичні речовини [19, 20].

Технології для підвищення ефективності використання енергії

Когенерація та тригенерація дозволяє забезпечити підвищення надійності, децентралізацію та диверсифікацію енергопостачання, може бути реалізована з використанням обладнання з високою енергетичною, екологічною та економічною ефективністю, забезпечує ряд переваг в порівнянні з роздільним виробництвом електричної та теплової енергії: підвищення загальної ефективності використання енергії палива; зменшення викидів забруднюючих речовин та парникових газів; зменшення грошових витрат під час життєвого циклу обладнання; можливість використання ВДЕ; можливість забезпечення широкого діапазону потужності та часткового балансування роботи енергосистеми України; зменшення втрат в мережах; зменшення споживання викопного палива та залежності від постачальника; забезпечення додатковими робочими місцями. Вартість когенераційних установок 500–2000 тис. дол. США за кВт встановленої потужності [22, 23].

Системи комбінованого виробництва охолодження, тепла і електроенергії (тригенераційні системи) є поєднанням міні-ТЕЦ і абсорбційних холодильних установок. Технологія дає можливість перетворити у холод до 80 % теплової потужності когенераційної установки, що значно збільшує її сумарну ефективність [24]. В якості первинних двигунів у тригенерації в основному використовуються газові двигуни та газові турбіни, потужність коливається від кількох кіловат до кількох мегават [25]. Вартість 340–3500 дол. США/кВт встановленої потужності в залежності від первинного генератора, найменшою є для дизельних двигунів (340–1000 дол. США) та газотурбінних установок (450–950 дол. США) [26].

Іншою технологією, яка збільшує ефективність використання ПЕР, є *теплові насоси* (ТН), які дозволяють на 1 кВт·год спожитої електроенергії отримувати 2–8 кВт·год теплоенергії. В країнах ЄС та в Україні ТН – це технологія відновлюваної енергії. Різниця між корисною енергією, що виробляється від ТН, і енергією, що використовується для приводу агрегату, вважається відновлюваною. В Україні виробляються теплові насоси невеликої потужності, в основному з імпортованих складових, вартістю співставні з китайськими. Вартість 1 кВт встановленої потужності ТН вітчизняного виробництва 154–633 євро без ПДВ, виробництва країн ЄС – 585–1748 євро/кВт [27]. Дослідження [28] показало вищу енергетичну ефективність ТН в порівнянні з газовою котельнею.

На сьогоднішній день собівартість ТН залишається набагато вищою, ніж традиційної опалювальної системи, що працює на викопному паливі, тому, головним чином, внаслідок енергетичної ефективності ТН забезпечується вигреш по терміну окупності, основний вплив на який дає ціна на паливо, що заміщується. В Україні відсутні законодавчі або економічні стимули впровадження ТН, не передбачається державне фінансування для реалізації пілотних проектів, які могли б бути хорошою рекламою і стимулом широкомасштабного застосування теплонасосної техніки [29].

Геотермальні або *грунтові теплові насоси* мають високий коефіцієнт перетворення (coefficient of performance (COP)) 4,5–5,5, який не залежить від зміни температури повітря, проте початкові витрати на монтаж ґрунтового контуру ТН займають майже 60 % від загальних витрат на будівництво, потрібен суттєвий обсяг земельних робіт при використанні горизонтальних ґрунтових колекторів та виділення значної земельної ділянки для них. ТН типу «вода-вода» мають середньорічний COP до 5,5, при установці у відкритих водоймах не вимагають дорогих бурильних і

монтажних робіт, проте облаштування свердловин збільшує початкові витрати на монтаж, а насоси для перекачування води збільшують споживання електроенергії для роботи ТН; необхідне скидання використаної води. Повітряні ТН в 1,5–2 рази дешевше, ніж геотермальні ТН, мають легкий монтаж і порівняно швидку окупність, проте їх COP значно зменшується при зниженні температури зовнішнього повітря. Є можливість використання в різних кліматичних умовах, в місцях відсутності централізованого електропостачання можливо використання енергії ВЕС та СЕС [27, 30].

Головним недоліком всіх типів ТН є їх висока ціна та, зазвичай, необхідність пікового (резервного) джерела теплопостачання.

Сучасні *електрокотли* часто є дуже енергоефективними і можуть забезпечити ефективне опалення при низькому споживанні електроенергії, можуть бути приєднані до електрогенераторів на ВДЕ або працювати в поєднанні з акумуляторами, що дозволить громаді зменшити свою залежність від традиційних джерел енергії та мати механізм регулювання графіків навантаження.

За методом підігріву теплоносія електричні котли діляться на три типи [31, 32]: тенові, електродні та індукційні. *Тенові* котли є найпоширенішими, застосовуються для індивідуального та промислового теплозабезпечення. Мають одиничну теплову потужність від 3 кВт до 30 кВт (побутові) та від 30 кВт до 1500 кВт (промислові) з температурним режимом теплоносія до 115 °С., ефективність 96–99 %, вартість від 11–51 дол. США/кВт (побутові, Tenko) та 10–17 дол. США/кВт (промислові, завод «Електротепломаш») від українських виробників до 68–173 дол. США/кВт (Bosch, Німеччина) від закордонних виробників.

4. Обговорення

Згідно з наведеними вище критеріями технології на ВДЕ та місцевих паливах доцільні до впровадження у громадах відповідно до наявності достатніх обсягів відповідних ПЕР. Зокрема, ефективність роботи вітрових та сонячних електростанцій суттєво залежить від місцевих природних та метеорологічних умов і має добову та сезонну залежність. Проведені дослідження щодо вибору оптимальної структури обладнання СЕС в залежності від її територіального розташування та добової інтенсивності сонячної радіації [33] показали суттєвий вплив цих факторів на обсяги та собівартість відпущеної електроенергії. Тому повне забезпечення споживання цими технологіями практично неможливо, а їх стохастичний характер генерації потребує використання резервного джерела енергії та акумуляційних систем. Для підтримки потужності СЕС в умовах зміни інтенсивності сонячного випромінювання доцільно використовувати акумуляційну систему, основні параметри якої можна отримати в результаті моделювання їх сукупної роботи [34]. Водночас низькі питомі капітальні витрати на впровадження сонячних фотоелектричних станцій та наявність їх державної підтримки відповідно до положень статей 9, 9¹, Закону України «Про альтернативні джерела енергії» від 20.02.2003 № 555-IV за рахунок зелених тарифів, які надаються до кінця 2029 року як об'єктам генерації з ВДЕ, так і генеруючим установкам приватних домогосподарств, споживачів, у тому числі енергетичних кооперативів, сприяють високій окупності таких проєктів [14]. Крім того, статтею 9³ цього Закону передбачено стимулювання виробників електричної енергії з альтернативних джерел енергії за участі на аукціонах з фіксацією виплат на рівні цінової пропозиції переможцю протягом 12 років. Для об'єктів ВДЕ, що мають наміри отримати державну підтримку, участь у аукціонах, які мають проводитися до кінця 2029 року, є добровільною, крім ВЕС потужністю більше 5 МВт та СЕС більше 1 МВт. Крім того, Законом України від 30.06.2023 № 3220-IX щодо відновлення та «зеленої» трансформації енергетичної системи запроваджено механізм ринкової премії, що передбачає роботу виробника на ринку з компенсацією йому «зеленого» чи аукціонного тарифу в рамках різниці між встановленим тарифом та вартістю електричної енергії, за якою він реалізував вироблену електроенергію, та механізму чистого вимірювання (NetBilling), що дозволяє активним споживачам, у яких встановлено генерацію на ВДЕ для власного споживання, продавати надлишки на ринкових умовах електропостачальнику за договорами самовиробництва.

Перевагами таких технологій на ВДЕ як ВЕС, СЕС, міні- та мікро-ГЕС є їх безвуглецева

екологічна чиста енергія. Електростанції на біомасі мають переваги щодо їх використання у базовому режимі навантаження та можливості диспетчеризації, проте їх недоліком є наявність впливу на довкілля – викидів забруднюючих речовин, утворення відходів.

Технології на викопному паливі доцільно використовувати як джерела базової генерації, резервні та аварійні потужності з урахуванням їх собівартості виробництва електроенергії, на яку впливають як загальні капіталовкладення, так і вартість первинного палива та інших ресурсів, що споживаються, а також екологічних обмежень, які діють як на рівні громад, так і загальнонаціональному рівні.

Всі наведені технології теплопостачання в певній мірі сприяють зниженню викидів – ко- та тригенерація за рахунок підвищення ефективності використання палива, електрокотли – за умови споживання електроенергії від ВДЕ, котли на біопаливі вважаються вуглецевонейтральними, проте в порівнянні з природним газом збільшуються викиди забруднюючих речовин та утворюються тверді відходи, які не завжди можливо утилізувати.

За критерієм економічної ефективності теплові насоси програють в питанні капіталовкладень, проте середньозважена собівартість теплоенергії за життєвий цикл за деяких умов менша, ніж від газових котлів [27].

Розподіл наведених технологій за наведеними в розділі 2 критеріями представлено в табл. 1. Всі технології мають перевагу лише за декількома критеріями, і рішення щодо впровадження конкретних технологій мають прийматись після ретельного аналізу енергоспоживання, наявних в громаді паливно-енергетичних ресурсів і відновлюваних джерел енергії, планів розвитку громади та з урахуванням законодавства та тенденцій щодо охорони навколишнього середовища.

Таблиця 1. Переваги технологій електро- та теплопостачання, які можуть бути використані для підвищення енергетичної незалежності окремих територіальних громад

	Скорочення зовнішнього постачання енергоресурсів	Використання місцевих або відновлюваних джерел енергії	Економічна ефективність	Швидкий монтаж	Енерго-ефективність	Екологічна ефективність
СЕС	+	+	+	+		+
дСЕС	+	+	+	+		+
ВЕС	+	+	+ -	+		+
Газопоршневі установки	+			+	+	+ -
Газотурбінні установки	+			+	+	-
Дизель-генераторні установки	+			+		-
Акумуляуючі пристрої	+		+ -	+		+ -
Міні-ГЕС	+	+				+
Використання біопалив	+	+	+			+ -
Когенерація та тригенерація	+		+		+	+
ТН ґрунтові	+	+	+ -		+	+
ТН повітряні	+	+	+ -	+	+	+
ТН водяні	+	+	+ -		+	+
Електрокотли	+			+		+

«+ -» технологія має переваги та недоліки в категорії

«-» технологія має гірші показники, ніж широко розповсюджена

5. Висновки

Розподілена генерація сприяє енергонезалежності громад та їх економічному розвитку, зростанню кількості робочих місць, зменшує втрати енергії під час передачі та розподілу. Використання технологій на відновлюваних джерелах енергії та більш енергоефективних технологій, в т.ч. на викопних паливах, сприяє зменшенню негативного впливу на навколишнє середовище як

локально, так і вносить вклад в боротьбу зі зміною клімату.

Для заміщення або зменшення використання викопних видів палива, підвищення енергонезалежності та надійності енергозабезпечення територіальних громад можливо використати наступні технології та обладнання: сонячні та вітрові електростанції, газопоршневі та газотурбінні установки, генератори, акумулятори, ко- та тригенераційні установки, біопалива, теплові насоси та електрокотли. Запропоновано критерії для аналізу та вибору технологій розподіленої електрогенерації та теплопостачання такі як економічна, енергетична і екологічна ефективність, використання місцевих та відновлюваних джерел енергії, простота та швидкість монтажу, за яким згруповано перелічені технології.

Технології на ВДЕ та місцевих паливах в більшості випадків не в змозі повністю забезпечити громади електричною та тепловою енергією у зв'язку з недостатньою кількістю зазначених ресурсів та високою вартістю обладнання, наприклад такого як акумулятори та теплові насоси.

Для визначення доцільності впровадження устаткування та обладнання в окремих громадах важливо враховувати наявність ресурсів, плани розвитку громади, їх вартість і здатність забезпечити потребу в електричній та тепловій енергії. Розвиток розподіленої генерації залежить від співвідношення цін на електричну енергію, природний газ та інші види палива, а також від можливості змінювати обсяги виробництва та споживання електричної та теплової енергії відповідно до економічної ситуації.

Внесок авторів. Концептуалізація, методологія, обговорення та висновки – В. Станиціна, Т. Нечаєва, формулювання концепції енергонезалежних громад – В. Троханяк, аналіз та систематизація інформації щодо: розподіленої електрогенерації – Т. Нечаєва, ко- та тригенерації – В. Горський, теплових насосів та біопаливних теплогенеруючих котлів – В. Станиціна, електрокотлів – О. Тесленко.

Фінансування роботи. Дослідження виконано за грантом №202/0129 «Формування технологічних структур децентралізованих енергосистем у повоєнній відбудові інфраструктури територіальних громад в контексті протидії зміни клімату» конкурсу «Наука для відбудови України у воєнний та повоєнний періоди» Національного фонду досліджень України.

Посилання

1. Kostenko G., Zaporozhets A. Enhancing of the power system resilience through the application of micro power systems (microgrid) with renewable distributed generation. *Системні дослідження в енергетиці*. 2023. Вип. 3(74). С. 25—38. <https://doi.org/10.15407/srenergy2023.03.025>
2. Kaplun V., Osypenko V. Energy Efficiency Analyses in Polygeneration Microgrids with Renewable Sources. *2020 IEEE 7th International Conference on Energy Smart Systems (ESS)*, Kyiv, Ukraine, 12–14 May 2020. <https://doi.org/10.1109/ess50319.2020.9160346>
3. Nadeem T. B., Siddiqui M., Khalid M. Distributed energy systems: A review of classification, technologies, applications, and policies. *Energy Strategy Reviews*. 2023. Vol. 48. P. 101096. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2023.101096>
4. Vezzoli C., Ceschin F., Osanjo L. Distributed/Decentralised Renewable Energy Systems. Designing Sustainable Energy for All. *Green Energy and Technology*. Springer, Cham. 2018. P. 23—29. https://doi.org/10.1007/978-3-540-46572-0_2
5. Amupolo A., Nambundunga S., Chowdhury D. S. P. Techno-Economic Feasibility of Off-Grid Renewable Energy Electrification Schemes: A Case Study of an Informal Settlement in Namibia. *Energies*. 2022. Vol. 15. No. 12. P. 4235. <https://doi.org/10.3390/en15124235>
6. Hargroves K., James B., Lane J. The Role of Distributed Energy Resources and Associated Business Models in the Decentralised Energy Transition: A Review. *Energies*. 2023. Vol. 16. No. 10. P. 4231. <https://doi.org/10.3390/en16104231>
7. Babak V., Dekusha O., Zaporozhets A., Vorobiov L., Kovtun S. Methods for Diagnosing the Technical Condition of Heating Networks Pipelines. In A. Zaporozhets (Eds). *Systems, Decision and Control in Energy IV. Studies in Systems, Decision and Control*. Springer, Cham. 2023. Vol. 454. https://doi.org/10.1007/978-3-031-22464-5_15
8. Розподілена генерація електроенергії – глобальні тенденції розвитку. *VABE*. URL: <https://uare.com.ua/novyny/453-rozpodilena-generatsiya-elektroenergiji-globalni-tendentsiji-rozvitku.html> (дата звернення 15.09.2023).

9. Unlocking the Potential of Distributed Energy Resources – Analysis – IEA. *IEA*. URL: <https://www.iea.org/reports/unlocking-the-potential-of-distributed-energy-resources> (дата звернення: 15.09.2023).
10. Зінченко А., Кунбуттаєва А. Малі учасники ВДЕ-ринку в Україні. Дослідження сегменту генерації встановленою потужністю до 1 МВт. Фонд ім. Гайнріха Бюлля. Київ, 2020. 30 с.
11. У 2021 році близько 15 тис. родин встановили СЕС, що майже удвічі більше, ніж у 2020 році. *Управління комунікації та зв'язків з громадськістю Держенергоєфективності*. URL: <https://sae.gov.ua/uk/news/4085> (дата звернення: 15.09.2023).
12. Renewable power generation costs in 2022. International Renewable Energy Agency. Abu Dhabi, 2022.
13. Вітряні або сонячні електростанції? Особливості використання землі під проекти. *ЕДС-Девелопмент*. URL: <https://eds-development.com/vitryani-abo-sonyachni-elektrostantsii-osoblivosti-vikoristannya-zemli-pid-proekti/> (дата звернення: 15.09.2023).
14. Маркін Я. Зелений тариф для домашніх СЕС: як заробити у 2022 році. *Kosatka.Media*. URL: <https://kosatka.media/category/blog/news/zelenyy-tarif-dlya-domashnih-ses-kak-zarabotat-v-2022-godu> (дата звернення 15.09.2023).
15. Using Distributed Energy Resources. A How-To Guide for Federal Facility Managers. *U.S. Department of Energy. Office of Energy Efficiency and Renewable Energy*. URL: <https://www.nrel.gov/docs/fy02osti/31570.pdf> (дата звернення: 15.09.2023).
16. Газова генерація: потреби і можливості. *Оператор ГТС України*. URL: <https://tsoua.com/news/gazova-generaciya-potreby-i-mozhlyvosti/> (дата звернення: 15.09.2023).
17. Distributed Generation of Electricity and its Environmental Impacts. *U.S. Environmental Protection Agency*. URL: <https://www.epa.gov/energy/distributed-generation-electricity-and-its-environmental-impacts> (дата звернення: 15.09.2023).
18. Білозерова Л. Теплова альтернатива: біомаса поступово заміщує природний газ. *Українська енергетика*. URL: <https://ua-energy.org/uk/posts/naturalna-alternatyva-biomas-a-postupovo-zamishchuie-pryrodniy-haz> (дата звернення: 15.09.2023).
19. Олійник Є., Антоненко В., Чаплигін С., Зубенко В. Підготовка та впровадження проектів заміщення природного газу біомасою при виробництві теплової енергії в Україні. Практичний посібник. За ред. Г. Гелетухи. Київ.: «Поліграф плюс», 2016. 104 с. <https://uabio.org/wp-content/uploads/2020/01/posibnyk-opovlenuyi-2016.pdf>
20. Bogoslavskaya O., Stanytsina V., Artemchuk V., Garmata O., Lavrinenko V. Comparative Efficiency Assessment of Using Biofuels in Heat Supply Systems by Levelized Cost of Heat into Account Environmental Taxes. In A. Zaporozhets, V. Artemchuk (Eds). *Systems, Decision and Control II. Studies in Systems, Decision and Control*. Springer, Cham. 2021. Vol. 346. P. 167—185. https://doi.org/10.1007/978-3-030-69189-9_10
21. Stanytsina V., Artemchuk V., Bogoslavskaya O., Ridei N., Zinovieva I. The influence of environmental tax rates on the Levelized cost of heat on the example of organic and biofuels boilers in Ukraine. *E3S Web of Conferences*, 280. 2021. 09012. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202128009012>
22. Степанов Д.В., Степанова Н.Д., Білик С.О. Енергомодернізація промислової котельні. *Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві*. 2021. № 29(2), С. 108—112. <https://doi.org/10.31649/2311-1429-2020-2-108-112>
23. Маляренко В.А., Шубенко О.Л., Андреев С.Ю., Бабак М.Ю., Сенечкий О.В. Когенераційні технології в малій енергетиці: монографія. 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.
24. Галько С. Ергозберігаюча тригенераційна установка з використанням гібридних сонячних фотоелектричних панелей. *Технічне забезпечення інноваційних технологій в агропромисловому комплексі. Матеріали I Міжнародної науково-практичної інтернет-конференції (Мелітополь, 01–24 квіт. 2020 р.)*. ТДАТУ: ред. кол. В.М. Кюрчев, В.Т. Надикто, О.Г. Скляр. Мелітополь: ТДАТУ, 2020. С. 443—448.
25. Li H., Fu L., Geng K., Jiang Y. Energy utilization evaluation of CCHP systems. *Energy utilization evaluation of CCHP systems*. 2006. Vol. 38. Iss. 3. P. 253—257. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2005.06.007>
26. Wu D. W., Wang R. Z. Combined cooling, heating and power: A review. *Progress in Energy and Combustion Science*. 2006. Vol. 32. Iss. 5-6. P. 459—495. <https://doi.org/10.1016/j.peccs.2006.02.001>
27. Станиціна В.В., Артемчук В.О. Перспективи впровадження деяких типів теплових насосів в Україні. *Електронне моделювання*. 2022. Том 44. № 6. С. 48—68. <https://doi.org/10.15407/emodel.44.06.048>
28. Білодід В.Д., Станиціна В.В. Оцінка ефективності вироблення теплової енергії теплонасосними станціями на основі теплоти низькотемпературних підземних вод за методологією повних енергетичних витрат. *Проблеми загальної енергетики*. 2020. Вип. 3(62). С. 46—52. <https://doi.org/10.15407/pge2020.03.046>
29. Стойков В., Постолюк Ю., Гулевський В. Про використання теплових насосів у розвинених країнах та широкомасштабне впровадження в Україні. *Технічне забезпечення інноваційних технологій в агропромисловому комплексі. Матеріали II Міжнародної науково-практичної інтернет-конференції (Мелітополь, 02–27 листопада. 2020 р.)*. ТДАТУ: ред. кол. В.М. Кюрчев, В.Т. Надикто, О.Г. Скляр. Мелітополь: ТДАТУ, 2020. С. 701—706. URL: <http://elar.tsatu.edu.ua/bitstream/123456789/12551/1/Стойков.pdf> (дата звернення: 15.09.2023).

30. Грунт-вода чи повітря-вода. Який тепловий насос для опалення вибрати для свого будинку? *NES*. URL: <https://nse.com.ua/heat-pumps/grunt-voda-chy-povitrya-voda/> (дата звернення: 15.09.2023).
31. Novikov P., Teslenko O., Beldii V., Lenchevsky E., Bunke O. Review of Technologies of Thermal Energy Generation Using High Voltage Electrode Boilers in the Context of Their Application as Energy Load Regulator. In A. Zaporozhets (Eds). *Systems, Decision and Control in Energy V. Studies in Systems, Decision and Control*. 2023. Vol. 481. P. 355—370. https://doi.org/10.1007/978-3-031-35088-7_18
32. Witkowski K., Haering P., Seidelt S., Pini N. Role of thermal technologies for enhancing flexibility in multi-energy systems through sector coupling: technical suitability and expected developments. *IET Energy Systems Integration*. 2020. Vol. 2. Iss. 2. P. 69—79. <https://doi.org/10.1049/iet-esi.2019.0061>
33. Bilenko M., Buratynskiy I., Leshchenko I., Nechaieva T., Shulzhenko S. Nonlinear Mathematical Model of Optimal Solar Photovoltaic Station Design. In A. Zaporozhets, V. Artemchuk (Eds). *Systems, Decision and Control in Energy II. Studies in Systems, Decision and Control*. Springer, Cham. 2021. Vol. 346. P. 49—61. https://doi.org/10.1007/978-3-030-69189-9_3
34. Буратинський І.М., Нечаєва Т.П. Моделювання сукупної роботи сонячної фотоелектричної електростанції та системи акумуляування електроенергії. *Проблеми загальної енергетики*. 2020. Вип. 3(62). С. 30—36. <https://doi.org/10.15407/pge2020.03.030>

ELECTRICITY AND HEAT SUPPLY TECHNOLOGIES FOR INCREASING THE ENERGY INDEPENDENCE OF CERTAIN TERRITORIAL COMMUNITIES

Valentyna Stanytsina^{1,2,3*}, PhD (Engin.), Senior Researcher, <https://orcid.org/0000-0002-1005-6185>

Tetiana Nechaieva^{1,2,3}, PhD (Engin.), Senior Researcher, <https://orcid.org/0000-0001-9154-4545>

Viktor Trokhaniak², PhD (Engin.), Associate Professor, <https://orcid.org/0000-0002-8084-1568>

Vitalii Horskyi^{1,2}, PhD, <https://orcid.org/0000-0001-9128-9556>

Oleksandr Teslenko^{1,2}, PhD (Engin.), Senior Researcher, <https://orcid.org/0000-0002-3772-5991>

¹General Energy Institute of NAS of Ukraine, 172, Antonovycha St., Kyiv, 03150, Ukraine;

²National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, 15, Heroiv Oborony St., Kyiv, 03041, Ukraine;

³State Institution “Center for evaluation of activity of research institutions and scientific support of regional development of Ukraine of NAS of Ukraine”, 54, Volodymyrska St., Kyiv, 03601, Ukraine

*Corresponding author: st_v_v@hotmail.com

Abstract. *Russian attacks on Ukraine's energy system, which led to the blackout of entire cities and the termination of district heating, highlighted the risks and disadvantages of relying on large-scale district energy supply for communities. In this context, it is important to consider the development of the energy supply of communities in the direction of their energy independence. The purpose of the article is to form a list of electricity generation and heat supply technologies for increasing the energy independence of individual territorial communities, which are appropriate for implementation in Ukraine. The article considers the criteria for the analysis and selection of technologies for distributed power generation and heat supply. An analytical overview of the following power generation and heat supply technologies is presented: solar and wind power plants, gas piston and gas turbine plants, generators, batteries, co- and trigeneration plants, biofuel power plants and heat-generating boilers, heat pumps and electric boilers, and their grouping is performed according to the established criteria. All the considered technologies contribute to reducing the external supply of communities with energy resources and reducing losses during the transmission and distribution of electricity. Technologies that use renewable energy sources and local fuels are appropriate for implementation in communities in accordance with the availability of sufficient amounts of resources. Still, in most cases, they are not able to fully provide communities with electrical and thermal energy due to their insufficient quantity and high cost of equipment, such as batteries and heat pumps. Decisions regarding the implementation of a specific technology of distributed generation should be made after a thorough analysis of the conditions and possibilities of the energy supply of each individual community. This article is aimed at discussing the options of increasing energy independence and ensuring the reliability of the energy supply of territorial communities in Ukraine.*

Keywords: distributed generation, power generation, heat supply, renewable energy sources, cogeneration, biofuels, heat pumps.

References

1. Kostenko, G., & Zaporozhets, A. (2023). Enhancing of the power system resilience through the application of micro power systems (microgrid) with renewable distributed generation. *System Research in Energy*, 3(74), 25–38. <https://doi.org/10.15407/srenergy2023.03.025>
2. Kaplun, V., & Osypenko, V. (2020, May 12–14). Energy Efficiency Analyses in Polygeneration Microgrids with Renewable Sources. *2020 IEEE 7th International Conference on Energy Smart Systems (ESS)*. Kyiv, Ukraine. <https://doi.org/10.1109/ess50319.2020.9160346>
3. Nadeem, T. B., Siddiqui, M., Khalid, M., & Asif, M. (2023). Distributed energy systems: A review of classification, technologies, applications, and policies. *Energy Strategy Reviews*, 48, 101096. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2023.101096/>
4. Vezzoli, C., Ceschin, F., & Osanjo, L. (2018). Distributed/Decentralised Renewable Energy Systems. Designing Sustainable Energy for All. *Green Energy and Technology*, 23–29, Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-540-46572-0_2
5. Amupolo, A., Nambundunga, S., Chowdhury, D. S. P., & Grün, G. (2022). Techno-Economic Feasibility of Off-Grid Renewable Energy Electrification Schemes: A Case Study of an Informal Settlement in Namibia. *Energies*, 15(12), 4235. <https://doi.org/10.3390/en15124235>
6. Hargroves, K., James, B., Lane, J., & Newman, P. (2023). The Role of Distributed Energy Resources and Associated Business Models in the Decentralised Energy Transition: A Review. *Energies*, 16(10), 4231. <https://doi.org/10.3390/en16104231>
7. Babak, V., Dekusha, O., Zaporozhets, A., Vorobiov, L., & Kovtun, S. (2023). Methods for Diagnosing the Technical Condition of Heating Networks Pipelines. In A. Zaporozhets (Eds). *Systems, Decision and Control in Energy IV. Studies in Systems, Decision and Control*, 454, Springer, Cham. [in Ukrainian]. https://doi.org/10.1007/978-3-031-22464-5_15
8. Distributed electricity generation – global development trends. (n.d.). *Ukrainian Renewable Energy Association*. URL: <https://uare.com.ua/novyny/453-rozpodilena-generatsiya-elektroenergiyi-globalni-tendentsiji-rozvitku.html> (Last accessed: 15.09.2023) [in Ukrainian].
9. *Unlocking the Potential of Distributed Energy Resources – Analysis – IEA*. (n.d.). IEA. URL: <https://www.iea.org/reports/unlocking-the-potential-of-distributed-energy-resources> (Last accessed: 15.09.2023).
10. Zinchenko, A., & Kunbuttaieva, A. (2020). Small participants in the RES market in Ukraine. Research of the generation segment with an installed capacity of up to 1 MW. Fund named after Heinrich Böll. Kyiv, 30 p. [in Ukrainian].
11. In 2021, about 15,000 families installed SES, which is almost twice as many as in 2020. (n.d.) *State Energy Efficiency of Ukraine*. URL: <https://sae.gov.ua/uk/news/4085> (Last accessed: 15.09.2023) [in Ukrainian].
12. Renewable power generation costs in 2022. (2022). International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.
13. *Wind or solar power plants? Features of land use*. (n.d.). *Eds-development*. URL: <https://eds-development.com/vitryani-abo-sonyachni-elektrostantsii-osoblivosti-vikoristannya-zemli-pid-proekti/> (Last accessed: 15.09.2023) [in Ukrainian].
14. *Green tariff for domestic SES: how to earn in 2022*. (n.d.). Energy news of Ukraine, the latest energy news of the world. *Kosatka.Media*. URL: <https://kosatka.media/category/blog/news/zelenyy-tarif-dlya-domashnih-ses-kak-zarobotat-v-2022-godu> (Last accessed: 15.09.2023) [in Ukrainian].
15. Using Distributed Energy Resources. A How-To Guide for Federal Facility Managers. (n.d.). U.S. Department of Energy. *Office of Energy Efficiency and Renewable Energy*. URL: <https://www.nrel.gov/docs/fy02osti/31570.pdf>. (Last accessed: 15.09.2023).
16. Gas generation: needs and opportunities. *The operator of the GTS of Ukraine*. (n.d.). URL: <https://tsoua.com/news/gazova-generacziya-potreby-i-mozhlyvosti/> (Last accessed: 15.09.2023) [in Ukrainian].
17. Distributed Generation of Electricity and its Environmental Impacts. (n.d.). *U.S. Environmental Protection Agency*. URL: <https://www.epa.gov/energy/distributed-generation-electricity-and-its-environmental-impacts> (Last accessed: 15.09.2023).
18. Bilozerova, L. Heat alternative: biomass is gradually replacing natural gas. *Ukrainian Energy*. (n.d.). <https://ua-energy.org/uk/posts/naturalna-alternatyva-biomasa-postupovo-zamishchuie-pryroodnyi-haz> (Last accessed: 15.09.2023) [in Ukrainian].
19. Oliinyk, Ye., Antonenko, V., Chaplyhin, S., & Zubenko, V. (2016). Preparation and implementation of projects to replace natural gas with biomass in the production of heat energy in Ukraine. Practical guide. Under the editorship G. Geletukhy. Kyiv: "Polygraph plus", 2016. 104 p.
20. Bogoslavskaya, O., Stanytsina, V., Artemchuk, V., Garmata, O., & Lavrinenko, V. (2021). Comparative Efficiency Assessment of Using Biofuels in Heat Supply Systems by Levelized Cost of Heat into Account Environmental Taxes. In A. Zaporozhets & V. Artemchuk (Eds). *Systems, Decision and Control in Energy II. Studies in Systems, Decision and Control*, 346, 167–185, Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-69189-9_10
21. Stanytsina, V., Artemchuk, V., Bogoslavskaya, O., Zinovieva, I., & Ridei, N. (2021). The influence of environmental tax rates on the Levelized cost of heat on the example of organic and biofuels boilers in Ukraine. *E3S Web of Conferences*, 280, 09012. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202128009012>

22. Stepanov, D., Stepanova, N., & Bilyk, S. (2021). Energy modernization of industrial boiler house. *Modern technology, materials and design in construction*, 29(2), 108–112 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.31649/2311-1429-2020-2-108-112>
23. Maliarenko, V.A., Shubenko, O.L., Andrieiev, S.Yu., Babak, M.Yu., & Senetskyi, O.V. (2018). Cogeneration technologies in small power generation: monograph. Kharkiv. nats. un-t misk. hosp-va im. O.M. Beketova, In-t problem mashynobud. im. A.M. Pidhornoho. Kharkiv: KhNUMH im. O.M. Beketova, 454 p.
24. Halko, S. (2020, April 01–24). Energy-saving three-generation installation using hybrid solar photovoltaic panels. *Technical support of innovative technologies in the agro-industrial complex: materials of the 1st International science and practice Internet conferences*. TDATU: red. kol. V.M. Kiurchev, V.T. Nadykto, O.H. Skliar, 443–448 [in Ukrainian].
25. Li, H., Fu, L., Geng, K., & Jiang, Y. (2006). Energy utilization evaluation of CCHP systems. *Energy utilization evaluation of CCHP systems*, 38, 3, 253–257. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2005.06.007>
26. Wu, D. W., & Wang, R. Z. (2006). Combined cooling, heating and power: A review. *Progress in Energy and Combustion Science*, 32(5-6), 459–495. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2006.02.001>
27. Stanytsina, V. V., & Artemchuk, V. O. (2022). Prospects for the Introduction of Several Types of Heat Pumps in Ukraine. *Elektronnoe modelirovanie*, 44(6), 48–68 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.15407/emodel.44.06.048>
28. Bilodid, V. D., & Stanytsina, V. V. (2020). Estimation of the efficiency of thermal energy production by heat pump stations on the basis of heat of low-temperature groundwater according to the methodology of full energy costs. *The Problems of General Energy*, 3(62), 46–52 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.15407/pge2020.03.046>
29. Stoikov, V., Postol, Yu., & Hulevskyi, V. (2020, November 2–27). About the use of heat pumps in developed countries and large-scale implementation in Ukraine. *Technical support of innovative technologies in the agro-industrial complex. Materials of the II International Scientific and Practical Internet Conference*. TDATU: ed. number V.M. Kyurchev, V.T. Nadykto, O.G. Sklyar. Melitopol: TDATU, 701–706. URL: <http://elar.tsatu.edu.ua/bitstream/123456789/12551/1/Stoykov.pdf>. (Last accessed: 15.09.2023) [in Ukrainian].
30. Soil-water or air-water. Which heat pump for heating should you choose for your home? "NOVI ENERGO SYSTEMS" LLC. (n.d.). LLC "NOVI ENERGO SYSTEMS". URL: <https://nse.com.ua/heat-pumps/grunt-voda-chy-povitrya-voda/> (Last accessed: 15.09.2023) [in Ukrainian].
31. Novikov, P., Teslenko, O., Beldii, V., Lenchevsky, E., & Bunke, O. (2023). Review of Technologies of Thermal Energy Generation Using High Voltage Electrode Boilers in the Context of Their Application as Energy Load Regulator. In A. Zaporozhets (Eds). *Systems, Decision and Control in Energy V. Studies in Systems, Decision and Control*, 481, 355–370. https://doi.org/10.1007/978-3-031-35088-7_18
32. Witkowski, K., Haering, P., Seidelt, S., & Pini, N. (2020). Role of thermal technologies for enhancing flexibility in multi-energy systems through sector coupling: technical suitability and expected developments. *IET Energy Systems Integration*, 2(2), 69–79. <https://doi.org/10.1049/iet-esi.2019.0061>
33. Bilenko, M., Buratynskyi, I., Leshchenko, I., Nechaieva, T., & Shulzhenko, S. (2021). Nonlinear Mathematical Model of Optimal Solar Photovoltaic Station Design. In A. Zaporozhets & V. Artemchuk (Eds). *Systems, Decision and Control in Energy II. Studies in Systems, Decision and Control*, 346, 49–61, Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-69189-9_3
34. Buratynskyi, I. M., & Nechaieva, T. P. (2020). Modeling of the combined operation of a solar photovoltaic power plant and a system of electric energy storage. *The Problems of General Energy*, 3(62), 30–36 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.15407/pge2020.03.030>

Надійшла до редколегії: 29.09.2023