

10.1016/j.renene.2019.11.089.

30. Sustainable Urban Energy Planning: A handbook for cities and towns in developing countries. New York, UN Environment Programme, 2010. 83 p. — <https://sustainabledevelopment.un.org/index.php?page=view&type=400&nr=293&menu=1515>

31. Порядок розроблення та оновлення місцевих енергетичних планів. Київ : Міністерство інфраструктури України, 2023. 32 с. — <https://mtu.gov.ua/news/34436.html>

32. Dane A., Wojciechowski T., Kane T. Kling P., Simon D., Resick J., Seaman C. and Kazmierski B. Municipal Energy Planning. An Energy Efficiency Workbook. University of Wisconsin-Cooperative Extension. 2010. 45 p. — <https://polk.extension.wisc.edu/files/2010/12/Municipal-Energy-Planning-Workbook.pdf>

33. Undaf Companion Guidance: Theory of Change. New York: United Nations Development Group, 2017. 15 p. — <https://www.undg.org>

34. Regional Energy Plan Reports. — <https://www.countyofessex.ca/en/discover-the-county/regional-energy-planning.aspx>

35. Wei-Ming C., Young-Doo W., Jong C.H., Youn C.P. A Regional Energy Planning Approach: an Integrated Framework and its Application to Jeju Island's Renewable Roadmap. IGI Global, 2015. DOI: 10.4018/978-1-4666-8433-1.ch009.

36. Gilleo A., Ribeiro D. Regional Energy Efficiency Efforts: Energy for the Power of Region and Beyond. American Council for an Energy-Efficient Economy. Washington, 2016, 35 p. — <https://c2e2.unepdtu.org/wp-content/uploads/sites/3/2016/03/regional-ee-planning.pdf>

37. Regional Energy Plan — 2018. — <https://www.ccrpcvt.org/our-work/our-plans/regional-energy-plan>

38. Regional Energy Plan — 2019. — <https://www.trorc.org/programs/energy/regional-energy-plan>

39. Нікітін Є.Є., Комков І.С. Геоінформаційні аспекти модернізації систем теплозабезпечення міст. *Енерготехнології та ресурсозбереження*. 2021. № 2. С. 44–51. DOI: 10.33070/etars.2.2021.04.

40. Regional Energy Planning. — <https://centralvtplanning.org/programs/regional-energy-planning>

Надійшла до редакції 23.12.2023

УДК 621.311.23:681.5.037.7
DOI: 10.33070/etars.1.2024.04

Тесленко О.І., канд. техн. наук, ORCID: 0000-0002-3772-5991

Інститут загальної енергетики Національної академії наук України
вул. Антоновича, 172, 03150 Київ, Україна, e-mail: teslenko1961@gmail.com

Енергетичний потенціал розподіленої генерації на потужних котельнях України в умовах воєнної агресії

Анотація. Об'єднана енергосистема України (ОЕС) цілеспрямовано руйнується російським агресором та зазнає значних пошкоджень, що обумовило довготривалі аварійні перебри електропостачання об'єктів критичної інфраструктури, підприємств та населення. Одним із шляхів підвищення стійкості ОЕС України є збільшення в її складі частки розподіленої генерації. Концептуальною ідеєю вирішення цієї проблеми є перетворення існуючих об'єктів критичної інфраструктури із споживачів електроенергії в її виробників-постачальників, які забезпечать власні потреби в електроенергії і потреби інших її споживачів. Такими об'єктами в умовах війни можуть стати котельні систем централізованого теплопостачання (СЦТ) міст України з їх існуючою електроенергетичною та паливною інфраструктурою. Автором пропонується широке впровадження на котельнях СЦТ енергоефективних когенераційних газопоршневих установок (КГПУ). КГПУ контейнерного типу є типовим серійним обладнанням, яке виробляється в Україні та за її межами та має стислі

терміни впровадження (до 5 днів з дати доставки на промисловий майданчик котельні). Висока маневрова здатність КГПУ дає можливість підвищити гнучкість ОЕС України. Наведено основні техніко-економічні показники розподіленої генерації з використанням КГПУ на існуючих котельнях для подальшого національного планування розвитку розподіленої генерації протягом воєнного стану та післявоєнної відбудови України. Застосування КГПУ на котельнях СЦТ міст України має потенційну можливість забезпечити додаткову розподілену генерацію загальною потужністю до 2365,7 МВт, зокрема 1224,8 МВт на 158 котельнях тепловою потужністю 100 Гкал/год та більше (612 одиниць КГПУ середньою одиничною електричною потужністю 2,0 МВт кожна); 561,9 МВт на 409 котельнях від 20 до 100 Гкал/год (803 КГПУ по 0,7 МВт кожна); 561,9 МВт на 2101 котельнях від 3 до 20 Гкал/год (4136 КГПУ по 0,14 МВт кожна). За умов 8-годинного на добу використання встановленої потужності КГПУ на котельнях СЦТ щомісяця буде вироблятися 567,8 тис. МВт·год електроенергії та споживатися 136–142 млн м³ природного газу. За середньою питомою вартістю модульних КГПУ (постачання «під ключ») від 800 до 950 дол./кВт встановленої електричної потужності капітальні витрати на впровадження КГПУ загальною потужністю 2365,7 МВт складуть 1,89–2,25 млрд дол. *Бібл. 31, рис. 3.*

Ключові слова: розподілена генерація, централізована система теплопостачання, котельні, когенераційні газопоршнєві установки.

Постійними ракетними атаками по інфраструктурі Об'єднаної енергетичної системи (ОЕС) України російський агресор намагається зламати супротив української нації та її прагнення до незалежності, посіяти у громадян України зневіру в спроможність подальшої боротьби та власну перемогу. Однак державна влада та український народ вже продемонстрували свою незламність як на воєнному, так і на енергетичному фронтах. З 10 жовтня 2022 р. ОЕС України цілеспрямовано та наполегливо руйнується російським агресором та зазнає значних пошкоджень, що обумовило довготривалі аварійні перерви електропостачання об'єктів критичної інфраструктури, підприємств та населення.

Одним із шляхів підвищення надійності ОЕС України є збільшення в її складі частки розподіленої генерації внаслідок широкого впровадження міні-електростанцій та міні-ТЕЦ. Розподіленою генерацією вважають виробництво енергії «на рівні розподільчої мережі або на стороні споживача, під'єданого до такої мережі» [1]. При цьому розподілена генерація може використовуватися для вироблення як електроенергії, так і теплоти або холоду (когенерація). Директива ЄС 2019/944 [2] визначає розподілені енергетичні ресурси у контексті розподілених енергетичних технологій: виробництво (generation), накопичення (storage) та управління попитом (demand response). Однак до таких ресурсів необхідно також додати місцеві види паливно-енергетичних ресурсів як природного, так і антропогенного походження. Закон України «Про ринок

електричної енергії» визначає розподілену генерацію як «електростанція встановленої потужності 20 МВт та менше, приєднана до системи розподілу електричної енергії» [3].

У довоєнний час та під час воєнної агресії Росії проти України вивченню цієї проблеми та шляхів її вирішення присвячена значна кількість досліджень українських та закордонних фахівців, зокрема [4–15].

Концептуальною ідеєю вирішення визначеної проблеми є перетворення існуючих об'єктів критичної інфраструктури із споживачів електроенергії в її виробників-постачальників, які забезпечать власні потреби в електроенергії та потреби інших її споживачів, насамперед інших об'єктів критичної інфраструктури (рис. 1).

Такими множинними об'єктами в умовах війни можуть стати котельні систем централізованого теплопостачання (СЦТ) міст України з їх існуючою електроенергетичною інфраструктурою та розгалуженою системою постачання природного газу. Ці котельні розташовані у містах в безпосередній близькості до інших об'єктів критичної інфраструктури (систем централізованого водопостачання та водовідведення, об'єктів медичної сфери, об'єктів виготовлення та зберігання харчових продуктів тощо) та можуть забезпечувати їх електроенергією через існуючі розподільчі електромережі міст.

Порівняльний аналіз доступних технологій розподіленої генерації показав, що в умовах дефіциту часових, матеріальних та фінансових ресурсів воєнного періоду найбільш доцільним є

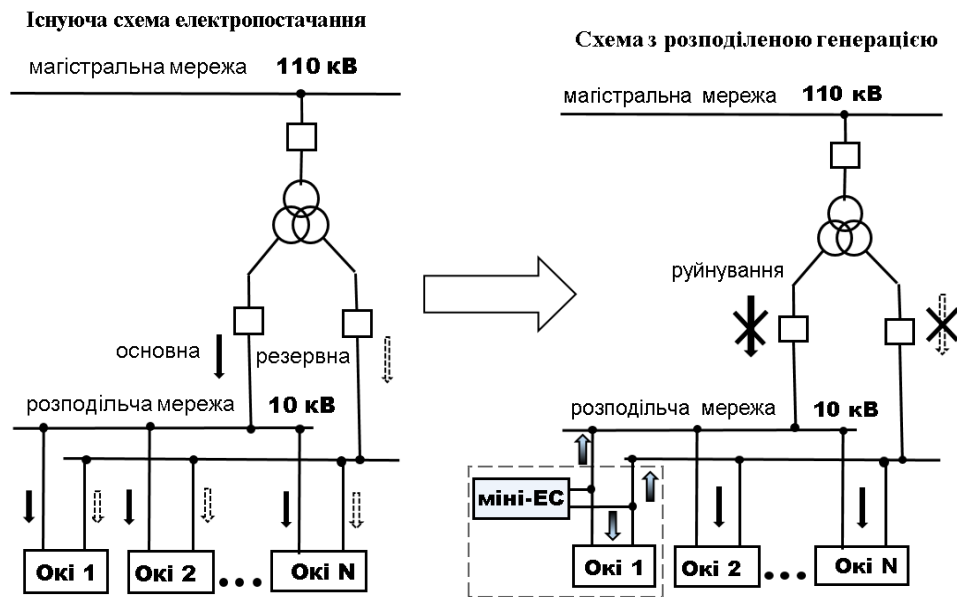


Рис. 1. Трансформація об'єктів критичної інфраструктури (Окі) в складові розподіленої генерації.

Figure 1. Transformation of critical infrastructure objects (Окі) into components of distributed generation.

швидко оснащення існуючих котелень СЦТ міст України, які є об'єктами критичної інфраструктури, когенераційними газопоршневими установками (КГПУ) модульного (контейнерного) типу. Інші технології розподіленої генерації, зокрема з використанням біопалива (твердого, рідинного, газоподібного, а також мулового осаду або побутового сміття), потребують суттєвих капітальних витрат, під'єднання нових електромереж (земле-відведення, погодження, додаткові витрати на кабельну продукцію, електроопори, розподільчі та трансформаторні підстанції та інше), виконання та довготривалого погодження оцінки впливу на довкілля, характеризуються довготерміновою реалізацією (більше 2–3 років), хоч і мають суттєву перевагу як розподіленої генерації: використання місцевих відновлюваних паливно-енергетичних ресурсів. Сонячні та вітрові електростанції не можуть забезпечити гарантоване виробництво та постачання електроенергії, а їх економічно доцільна комплектація високовартісними накопичувачами електроенергії здатна забезпечити постачання електроенергії споживачеві протягом 4–6 годин на добу [16].

Перевагами запропонованого рішення (КГПУ) є наявність відповідної інфраструктури на промислових майданчиках існуючих котелень: підведені лінії електропередач та наявні трансформаторні підстанції для видачі електроенергії до

місцевих розподільчих електромереж з метою електропостачання інших об'єктів критичної інфраструктури та місцевого населення (не потребує додаткових витрат на їх будівництво); котельні СЦТ є споживачами електроенергії першої та другої категорії [17, 18], що дає можливість використовувати одночасно дві електролінії (основну та резервну) для видачі електричної потужності до розподільчої електромережі; існуючі газогони постачання природного газу на ці котельні; висока енергоефективність завдяки когенерації електричної та теплової енергії; стислі терміни постачання, монтажу та налагоджування устаткування; наявність високопрофесійного персоналу.

Єдиним, але суттєвим недоліком таких КГПУ є залежність від централізованого постачання газоподібного палива — природного газу. Однак, якщо на котельні СЦТ не буде постачатися природний газ внаслідок руйнування розосередженої газотранспортної та газорозподільчої інфраструктури, то не буде виробництва теплової енергії. Зважаючи на підземне прокладання газогонів, вірогідність таких обставин значно менша, ніж руйнування агресором розподільчих електромереж.

Технічні переваги КГПУ [19, 20] наведені нижче.

1. **Висока ефективність.** Механічним джерелом когенераційного вироблення енергії в

КГПУ є приводний газопоршневий V-подібний двигун внутрішнього згоряння із загальним коефіцієнтом використання енергії палива близько 90 %. Електричний ККД сучасних КГПУ досягає до 42,2–44,2 %, тепловий ККД — до 43,3–45,2 %. Така висока енергоефективність використання палива у 1,5 рази перевищує ефективність використання палива на існуючих теплофікаційних паротурбінних енергоблоках ТЕЦ, які експлуатуються на поточний час в Україні. Когенераційний виробіток електроенергії на КГПУ відноситься до виробітку теплової енергії як 1 : 1. Однак при цьому виробляється універсальний енергоресурс — електроенергія, яка при використанні її у тепловому насосі надає втричі-вчетверо більше теплової енергії. Таким чином, загальна ефективність використання палива може досягати 150–200 % (із залученням тепловим насосом низькопотенційної теплової енергії довікля).

2. Низькі експлуатаційні витрати. КГПУ дуже економічні: витрата природного газу — не більше 0,24–0,25 $\text{нм}^3/\text{кВт}\cdot\text{год}$ електроенергії при питомій теплоті згоряння газу 9,5 $\text{кВт}\cdot\text{год}/\text{нм}^3$ (8180 $\text{ккал}/\text{нм}^3$), а моторного масла — 0,15–0,30 $\text{г}/\text{кВт}\cdot\text{год}$ електроенергії із супутнім виробництвом у котлі-утилізаторі теплової енергії у вигляді гарячої води 90–110 °С.

3. Зниження витрат на технічне обслуговування. КГПУ мають ресурс до 80 тис. операційних годин до капітального ремонту, а повний термін служби досягає 25 років. Зазвичай КГПУ працює з низькою частотою обертання вала двигуна (1000 об./хв), що забезпечує більший термін експлуатації, суттєве зниження витрат на технічне обслуговування (менша кількість запальних свічок для заміни, менша кількість деталей, що працюють у режимі змінних навантажень), коротші терміни повернення інвестицій.

4. Експлуатація на газоподібному паливі з мереж низького та середнього тиску 20–300 мбар (0,02–0,3 $\text{кгс}/\text{см}^2$). КГПУ не потребують застосування спеціального високовартісного бустерного (дожимного) компресора на газовій магістралі, що здешевлює проект КГПУ в цілому.

5. Експлуатація на різних видах газоподібного палива. Крім природного газу, як паливо КГПУ можуть використовувати й інші види газів (біогази, газ очисних споруд стічних вод, звалищний газ, шахтний газ, доменний газ, коксовий газ та ін.) з низькими значеннями ме-

танового індексу ($MN \geq 33$) та теплотворної здатності (від 3 $\text{кВт}\cdot\text{год}/\text{нм}^3$, що втричі менше, ніж у природного газу). Останні дослідження показали, що сучасні КГПУ можуть ефективно працювати на суміші природного газу та водню (до 15 % водню в загальному об'ємі паливної суміші) без додаткової зміни їх конструкції.

6. Компактність. Модульні (контейнерні) КГПУ мають компактні розміри, що дає можливість розміщувати їх на промислових майданчиках існуючих котельень. Модульна КГПУ електричною потужністю 2 МВт має розмір контейнера 3,2 × 3,2 × 15,0 м (висота × ширина × довжина).

7. Серійність виробництва. КГПУ контейнерного типу є типовим серійним обладнанням, яке виробляється в Україні (ТДВ «Первомайськдизельмаш», м. Первомайськ Миколаївської обл.) та за її межами та має стислі терміни впровадження (до 5 днів з дати доставки на промисловий майданчик котельні).

8. Висока маневреність без обмежень ресурсу. Сучасні КГПУ адаптовані до змінного добового графіка електричного навантаження від 100 до 50 % (включно) без будь-яких обмежень терміну експлуатації, а також до можливості виконувати 1–2 пуски агрегату на добу (наприклад, зупинка КГПУ на ніч із наступним пуском вранці) без скорочення моторесурсу. Висока маневрова здатність КГПУ дає можливість підвищити гнучкість ОЕС України під час воєнного стану та у післявоєнній перспективі.

Мета дослідження

Визначення основних техніко-економічних показників розподіленої генерації з використанням КГПУ на існуючих котельнях СЦТ міст України для подальшого планування заходів з впровадження складових розподіленої генерації протягом воєнного стану та післявоєнної відбудови країни. Одержані аналітичні результати цього дослідження мають бути використані як підґрунтя для ухвалення концептуальних рішень на національному рівні щодо трансформації котельень СЦТ в елементи розподіленої генерації країни. У цьому дослідженні основна увага приділена аналізу на національному та регіональному (обласному) рівнях, що є основою для подальшого, більш детального вибіркового аналізу на рівні окремих підприємств СЦТ міст України.

Об'єктами дослідження були котельні СЦТ

міст України, які згідно із Законом України «Про теплопостачання» [21] поділяються на:

— системи помірно-централізованого теплопостачання — сукупність джерел теплової енергії потужністю від 3 до 20 Гкал/год, магістральних та/або місцевих (розподільчих) теплових мереж;

— системи централізованого теплопостачання — сукупність джерел теплової енергії (зазвичай із сукупністю джерел теплової енергії понад 20 Гкал/год), магістральних та місцевих (розподільчих) теплових мереж, що об'єднані між собою та використовуються для теплозабезпечення споживача, населеного пункту, яка включає системи децентралізованого та помірно-централізованого теплопостачання.

Державною статистичною службою України (Держстат України) котельні умовно поділені на чотири статистичні групи за тепловою потужністю: до 3 Гкал/год; від 3 до 20 Гкал/год; від 20 до 100 Гкал/год; 100 Гкал/год та більше.

За 2014 р. 604 котельнями тепловою потужністю понад 20 Гкал/год (23,26 МВт), що становлять 1,95 % від загальної кількості опалювальних котелень України, було вироблено близько 61,3 % загального виробництва теплової енергії опалювальними котельнями для СЦТ України. Зокрема, за той же період 161 котельнями потужністю 100 Гкал/год (116,3 МВт) та більше (0,52 % загальної кількості котелень з котлами сумарною тепловою потужністю 48,99 ГВт або 43,8 % сумарної потужності опалювальних котелень) було вироблено 46,2 % загального виробництва теплової енергії, а саме: 141,2 ТДж/рік [22].

Така ситуація обумовлює необхідність першочергової уваги до цих потужних котелень при розробці національної стратегії формування розподіленої генерації у напрямку трансформації існуючих котелень СЦТ в міні-ТЕЦ.

Методичні положення та вихідні дані

Як вихідні дані щодо показників систем теплопостачання України була використана крайня статистична інформація про основні показники роботи опалювальних котелень та теплових мереж в Україні за 2014 р. [22] та 2013 р. [23], що була оприлюднена Держстатом України. Інформація Держстату України, яка була використана при виконанні цього дослідження, є недостатньо повною та сучасною, проте вона дає можливість зробити певні висновки щодо наявності потенцій-

ної можливості використання промислових майданчиків існуючих котелень СЦТ країни для розміщення на них елементів розподіленої генерації, а саме КГПУ. Доступна інформація дає можливість надати загальну картину як на національному, так і на регіональному (обласному) рівнях та проаналізувати важливі показники котелень СЦТ — потенційних виробників електричної енергії.

Методичні положення щодо визначення основних техніко-економічних показників розподіленої генерації з використанням КГПУ на існуючих котельнях СЦТ України передбачали наведену нижче послідовність розрахунків.

Для кожної з трьох обраних статистичних груп котелень СЦТ (група 1 — котельні тепловою потужністю від 3 до 20 Гкал/год, група 2 — від 20 до 100 Гкал/год, група 3 — 100 Гкал/год та більше) кожної області країни та м. Києва було визначено середню теплову потужність умовної котельні $N_{ji}^{сеп}$ окремої статистичної групи за формулою:

$$N_{ji}^{сеп} = N_{ji} / M_{ji}, \quad (1)$$

де $j = 1, \dots, 24$ — порядковий номер та загальна кількість областей в країні; $i = 1, \dots, 3$ — порядковий номер та загальна кількість статистичних груп котелень СЦТ; N_{ji} — сумарна потужність опалювальних котелень групи i в міських поселеннях області j країни на кінець 2014 р., Гкал/год; M_{ji} — кількість опалювальних котелень статистичної групи i в міських поселеннях області j країни на кінець 2014 р., од.

При обрахунках консервативно прийнято, що усі ці потужні котельні СЦТ України використовують природний газ як паливо.

Пропускна потужність лінії електропостачання $P_{ji}^{сеп}$ на умовну котельню середньої теплової потужності $N_{ji}^{сеп}$ окремо для кожної статистичної групи котелень i області j обраховувалася за формулою:

$$P_{ji}^{сеп} = N_{ji}^{сеп} \cdot e_i, \quad (2)$$

де e_i — питоме споживання електроенергії на виробництво теплової енергії (безпосередньо котельним обладнанням та мережевими насосами), визначене за довідником [24].

Визначення кількості КГПУ ($K_{ji}^{КГПУ}$) та їх сумарної електричної потужності $P_{ji}^{КГПУ}$ для кожної статистичної групи котелень i області j виконувалося за таких умов: для котелень тепловою

потужністю від 3 до 20 Гкал/год (група 1) заплановано впровадження КГПУ одиначною електричною потужністю $N_1^{КГПУ} = 0,14$ МВт, для котелень потужністю від 20 до 100 Гкал/год (група 2) $N_2^{КГПУ} = 0,7$ МВт, для котелень від 100 Гкал/год та більше (група 3) $N_3^{КГПУ} = 2,0$ МВт із застосуванням формул (3) та (4) з використанням цілочисельної частини одержаного показника:

$$K_{ji}^{КГПУ} = (2 \cdot P_{ji}^{сер}) / N_i^{КГПУ}; \quad (3)$$

$$N_{ji}^{КГПУ} = K_{ji}^{КГПУ} \cdot N_i^{КГПУ}. \quad (4)$$

Кількість КГПУ була підвищена вдвічі з огляду на необхідність забезпечити власні потреби котельні в електроенергії та потреби зовнішніх споживачів критичної інфраструктури з використанням однієї існуючої електролінії розподільчої електромережі. У випадку використання обох існуючих електроліній живлення котельні (основної та резервної) кількість КГПУ та їх електрична потужність може зрости втричі.

Річний сумарний виробіток електроенергії КГПУ, встановлених на котельнях СЦТ країни, визначався за формулою, МВт·год/рік:

$$E_p^{КГПУ} = \sum_{j=1}^{j+1} \sum_{i=1}^3 (N_{ji}^{КГПУ} \cdot T_p \cdot (365 - T_{np})) \quad (5)$$

за їх сумарною потужністю, кількістю годин роботи T_p на добу, кількістю днів у році (365 днів) та строком виконання ремонтно-профілактичних робіт T_{np} на рік (при розрахунках прийнято 12 днів).

Місячний сумарний виробіток електроенергії КГПУ, встановлених на котельнях СЦТ країни, визначався за формулою, МВт·год/міс:

$$E_{mic}^{КГПУ} = \sum_{j=1}^{j+1} \sum_{i=1}^3 (N_{ji}^{КГПУ} \cdot T_p \cdot 30) \quad (6)$$

за їх сумарною потужністю, кількістю годин роботи T_p на добу, кількістю днів у місяці (30 днів).

Річне сумарне споживання природного газу КГПУ на СЦТ в країні визначалося за формулою:

$$B_p^{КГПУ} = \sum_{j=1}^{j+1} \sum_{i=1}^3 [(N_{ji}^{КГПУ} \cdot T_p \cdot (365 - T_{np}) \cdot b_i^{КГПУ})], \quad (7)$$

де $b_i^{КГПУ}$ — питоме споживання палива (природного газу) КГПУ на виробництво електричної енергії (за групою i) приймалося рівним $0,24-0,25$ нм³/кВт·год електроенергії при питомій теплоті згоряння газу $9,5$ кВт·год/нм³ (8180 ккал/нм³).

Місячне сумарне споживання природного газу КГПУ на СЦТ в країні визначалося за формулою:

$$B_{mic}^{КГПУ} = \sum_{j=1}^{j+1} \sum_{i=1}^3 [(N_{ji}^{КГПУ} \cdot T_p \cdot 30) \cdot b_i^{КГПУ}] \quad (8)$$

Капітальні витрати визначалися за формулою:

$$C^{КГПУ} = \sum_{j=1}^{j+1} \sum_{i=1}^3 (N_{ji}^{КГПУ} \cdot c_i^{КГПУ}) \quad (9)$$

де $c_i^{КГПУ}$ — питомі капітальні витрати на впровадження КГПУ (за групою i) з врахуванням додаткових витрат на під'єднання до електромережі приймалося рівним $800-950$ дол./кВт встановленої електричної потужності КГПУ (за групою i). При цьому менші значення відносяться до КГПУ більшої електричної потужності, а більші значення — до КГПУ меншої електричної потужності.

Результати досліджень та їх аналіз

Результати розрахунків щодо визначення кількості КГПУ та їх сумарної електричної потужності за статистичними групами існуючих котелень для областей України та м. Києва (оцінка для впровадження) наведено на рис. 2, для обласних центрів України та м. Києва (оцінка для впровадження) — на рис. 3.

Впровадження КГПУ на котельнях СЦТ міст України має потенційну можливість забезпечити додаткову розподілену генерацію загальною потужністю до $2365,7$ МВт, зокрема $1224,8$ МВт на 158 котельнях тепловою потужністю 100 Гкал/год та більше (612 одиниць КГПУ середньою одиначною електричною потужністю $2,0$ МВт кожна); $561,9$ МВт на 409 котельнях від 20 до 100 Гкал/год (803 КГПУ по $0,7$ МВт кожна); $561,9$ МВт на 2101 котельнях від 3 до 20 Гкал/год (4136 КГПУ по $0,14$ МВт кожна).

За умови 8-годинного на добу використання встановленої потужності КГПУ на котельнях СЦТ (річний коефіцієнт використання встановленої потужності дорівнює 33%) щороку буде ви-

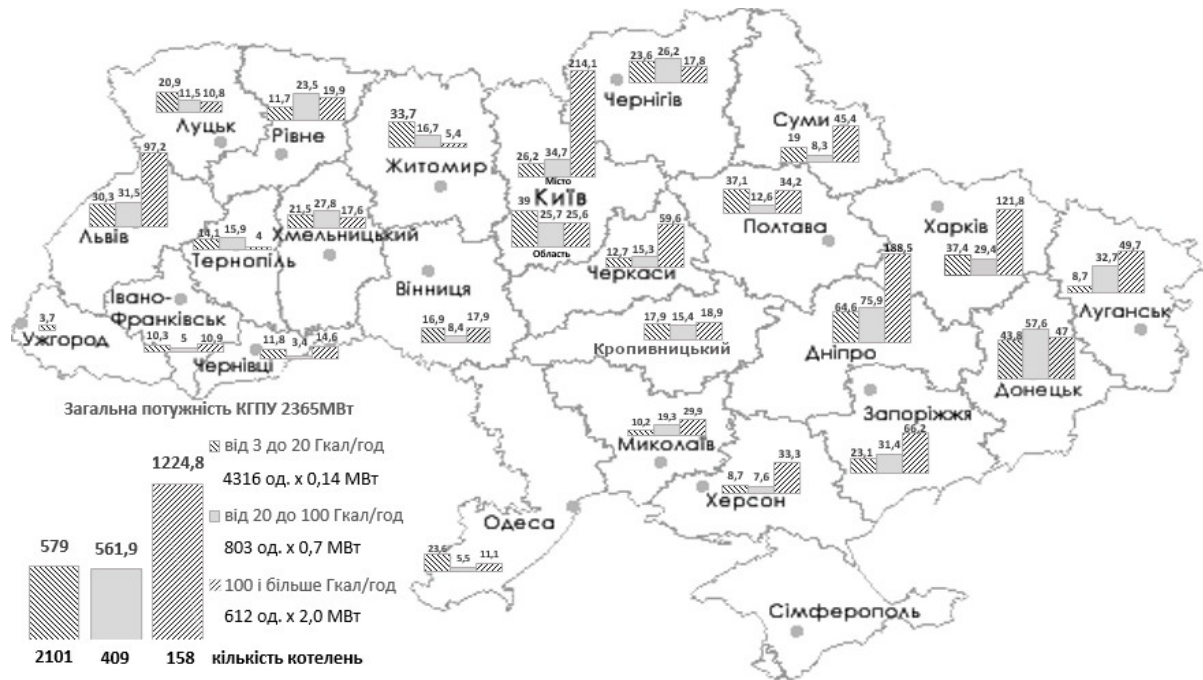


Рис. 2. Електроенергетичний потенціал впровадження КГПУ (кількість та їх електрична потужність) на опалювальних котельнях в міських поселеннях областей України (окремо м. Київ).

Figure 2. The electric energy potential of the implementation of CGPU (quantity and electrical capacity) at heating boiler houses in urban settlements of the regions of Ukraine (in particular, the city of Kyiv).



Рис. 3. Електроенергетичний потенціал впровадження КГПУ (кількість та їх електрична потужність) на опалювальних котельнях в обласних центрах України.

Figure 3. The electric energy potential of the implementation of CGPU (quantity and their electrical capacity) at heating boiler houses in the regional centers of Ukraine.

роблятися 6,643 млн МВт·год електроенергії (враховуючи споживання котелень на власні потреби та відпуск до мережі іншим споживачам) та споживатися 1,59–1,66 млрд м³ природного газу. Супутнім ефектом когенераційної технології стане додаткове виробництво 1,58 млн Гкал теплової енергії на рік, що забезпечить щорічну економію 207 млн м³ природного газу. За таких умов використання встановленої потужності КГПУ на котельнях СЦТ щомісяця буде вироблятися 567,8 тис. МВт·год електроенергії та споживатися 136–142 млн м³ природного газу.

За середньою питомою вартістю модульних КГПУ (проект «під ключ») 800–950 дол./кВт встановленої електричної потужності капітальні витрати на впровадження КГПУ загальною потужністю 2365,7 МВт складуть 1,89–2,25 млрд дол.

Порівняння визначеної загальної потужності КГПУ (2365,7 МВт) для впровадження на котельнях СЦТ міст України з необхідною електричною потужністю високоманеврових електростанцій (до 2000 МВт) та електростанцій швидкого старту (до 800 МВт) [25] демонструє суттєву можливість забезпечити потреби ОЕС в балансуємих потужностях. Висока маневрова здатність КГПУ дасть можливість підвищити гнучкість ОЕС України під час воєнного стану та у післявоєнній перспективі.

Зважаючи на масштабність такого проекту, була виконана оцінка впровадження КГПУ на котельнях СЦТ обласних центрів України, яка продемонструвала потенційну можливість забезпечити на першому етапі додаткову розподілену генерацію загальною потужністю до 1431 МВт, зокрема 855 МВт на 103 котельнях тепловою потужністю 100 Гкал/год та більше (428 одиниць КГПУ середньою одиничною електричною потужністю 2,0 МВт кожна); 325,9 МВт на 253 котельнях від 20 до 100 Гкал/год (466 КГПУ по 0,7 МВт кожна); 249,5 МВт на 817 котельнях від 3 до 20 Гкал/год (1782 КГПУ по 0,14 МВт кожна). Результати розрахунків щодо визначення кількості КГПУ та їх сумарної електричної потужності за статистичними групами існуючих котелень для обласних центрів України та м. Києва (оцінка для впровадження) наведено на рис. 3. За середньою питомою вартістю модульних КГПУ (проект «під ключ») 800–950 дол./кВт встановленої електричної потужності капітальні витрати на впровадження КГПУ загальною потужністю 1431 МВт на котельнях СЦТ обласних центрів України складуть 1,14–1,36 млрд дол.

Подальший напрям наукових досліджень

Розвиток інноваційних технологій використання відновлюваних джерел енергії є одним з основних трендів трансформації паливної структури світової енергетики загалом, зокрема і сектору теплозабезпечення, у напрямку її декарбонізації та залучення місцевих видів енергетичних ресурсів [26, 27]. У світовій практиці, особливо в європейських країнах, спостерігається та планується на найближчу перспективу широке використання сучасних теплонасосних технологій для ефективної утилізації низькопотенційної теплової енергії докільця в системах теплозабезпечення [28–30]. Зважаючи на значний енергетичний потенціал джерел низькопотенційної теплової енергії докільця в Україні [31] та на необхідність виконання міжнародних зобов'язань України щодо зменшення викидів парникових газів шляхом заміщення викопних палив, доцільні подальші наукові дослідження у напрямі підвищення ефективності використання встановленої потужності запропонованих КГПУ як місцевих джерел розподіленої генерації — постачальників електричної енергії для теплових насосів в складі локальних систем теплозабезпечення.

Висновки

Об'єднана енергосистема України цілеспрямовано руйнується російським агресором та зазнає значних пошкоджень, що обумовило довготривалі аварійні перерви електропостачання об'єктів критичної інфраструктури, підприємств та населення.

Одним із шляхів підвищення стійкості ОЕС України є збільшення в її складі частки розподіленої генерації. Концептуальною ідеєю вирішення цієї проблеми є перетворення існуючих об'єктів критичної інфраструктури із споживачів електроенергії в її виробників-постачальників, які забезпечать власні потреби в електроенергії та потреби інших її споживачів. Такими множинами об'єктами в умовах війни можуть стати котельні СЦТ міст України з їх існуючою електроенергетичною та паливною інфраструктурою.

Запропоновано широке впровадження на котельнях СЦТ як об'єктах критичної інфраструктури розподіленої генерації з використанням енергоефективної технології — когенераційних газопоршневих установок. КГПУ контейнерного типу є типовим серійним обладнанням, яке вироб-

ляється в Україні та за її межами, має стислі терміни впровадження (до 5 днів з дати доставки на промисловий майданчик котельні). Перевагами запропонованого рішення щодо впровадження КГПУ є наявність відповідної інфраструктури на промислових майданчиках існуючих котельень: підведені лінії електропередач та наявні трансформаторні підстанції для видачі електроенергії до місцевих розподільчих електромереж з метою електропостачання інших об'єктів критичної інфраструктури та місцевого населення (не потребує додаткових витрат на їх будівництво); котельні СЦТ є споживачами електроенергії першої та другої категорії, що дає можливість використовувати одночасно дві електролінії (основну та резервну) для видачі електричної потужності до розподільчої електромережі; існуючі газогони постачання природного газу на ці котельні; висока енергоефективність завдяки когенерації електричної та теплової енергії; стислі терміни постачання, монтажу та налагоджування устаткування; наявність високопрофесійного персоналу.

Впровадження КГПУ на котельнях СЦТ міст України має потенційну можливість забезпечити додаткову розподілену генерацію загальною потужністю до 2365,7 МВт, зокрема 1224,8 МВт на 158 котельнях тепловою потужністю 100 Гкал/год та більше (612 одиниць КГПУ середньою одиничною електричною потужністю 2,0 МВт кожна); 561,9 МВт на 409 котельнях від 20 до 100 Гкал/год (803 КГПУ по 0,7 МВт кожна); 561,9 МВт на 2101 котельнях від 3 до 20 Гкал/год (4136 КГПУ по 0,14 МВт кожна).

За середньою питомою вартістю модульних КГПУ (проект «під ключ») 800–950 дол./кВт встановленої електричної потужності капітальні витрати на впровадження КГПУ загальною потужністю 2365,7 МВт складуть 1,89–2,25 млрд дол.

Висока маневрова здатність КГПУ дасть можливість підвищити гнучкість ОЕС протягом воєнного стану та післявоєнної відбудови України.

Аналітична інформація цих досліджень має бути використана як основа для ухвалення концептуальних рішень на національному рівні щодо трансформації котельень СЦТ в елементи розподіленої генерації країни. У цьому дослідженні основна увага приділена аналізу на національному та регіональному (обласному) рівнях, що є основою для подальшого, більш детального вибіркового аналізу на рівні окремих підприємств СЦТ міст України. Визначені основні техніко-економічні показники розподіленої генерації з

використанням КГПУ на існуючих котельнях СЦТ є підґрунтям для подальшого планування заходів з впровадження складових розподіленої генерації протягом воєнного стану та післявоєнної відбудови України.

Список літератури

1. Guan F.H., Zhao D.M., Zhang X., Shan B.T., Liu Z. Research on distributed generation technologies and its impacts on power system. *International Conference: Sustainable Power Generation and Supply SUPERGEN'09* (2009, May). *IEEE Xplore*. DOI: 10.1109/SUPERGEN.2009.5348241.
2. Directive (EU) 2019/944 of the European Parliament and of the Council of 5 June 2019 on common rules for the internal market for electricity and amending Directive 2012/27/EU. — <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32019L0944>
3. Про ринок електричної енергії : Закон України від 13.04.2017 р. № 2019-VIII. *Відомості Верховної Ради*. 2017. № 27–28. — <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2019-19#Text>
4. Кириленко О.В., Праховник А.В. Енергетика сталого розвитку: виклики та шляхи побудови. *Праці Інституту електродинаміки НАН України. Спеціальний випуск*. 2010. С. 10–16.
5. Кириленко О.В., Павловський В.В., Лук'яненко Л.М. Технічні аспекти впровадження джерел розподільної генерації в електричних мережах. *Технічна електродинаміка*. 2011. № 1. С. 46–53. — <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/61941>
6. Word Energy Trilemma 2017: Changing Dynamics-Using Distributed Energy Resources to Meet the Trilemma Challenge. — <https://www.worldenergy.org/publications/entry/world-energy-trilemma-2017-changing-dynamics-a-using-distributed-energy-resources-to-meet-the-trilemma-challenge>
7. Кизим М.О., Лелюк О.В., Костенко Д.М. Оцінка і діагностика розвитку розподіленої енергетики в Україні. *Проблеми економіки*. 2018. № 4. С. 79–92. DOI: 10.32983/2222-0712-2018-4-79-92.
8. Нікітін Є.Є., Дутка О.В. Комплексний підхід до модернізації теплових джерел, теплових мереж та приєднаних до них будівель. *Енерготехнології та ресурсозбереження*. 2019. № 2. С. 16–23. DOI: 10.33070/etars.2.2019.03.
9. Колісник М. Розподілена генерація — важливий елемент Об'єднаної енергетичної системи України. Київ : Міністерство енергетики України, 2023. — <https://www.mev.gov.ua/povyna/rozpodilena-heneratsiya-vazhlyvyi-element-obyednanoyi-enerhetychnoyi-systemy-ukrayiny-mykola>
10. Алієва О. Розподілена ВДЕ-генерація. Фонд ім. Гайнріха Бюлля. Бюро Київ-Україна. 2020. 10 с. — <https://rea.org.ua/wp-content/uploads/2020/11/aliieva-181120.pdf>

11. Зінченко А., Бондарчук І., Хоменко В. Розподілені енергетичні ресурси та технології. *Програма розвитку ООН в Україні*. 2020. 24 с. — https://www.undp.org/sites/g/files/zskgke326/files/migration/ua/WhiteBook_DERT_deployment_in_Ukraine.pdf
12. Nikitin E.E., Komkov I.S. An Integrated Approach to the Development of Plans for Transformation of Electrical and Heat Supply Systems. *Енерготехнології та ресурсозбереження*. 2022. № 2. С. 4–16. DOI: 10.33070/etars.2.2022.01.
13. Denysov V. Efficiency of the renewable energy sources application for an autonomous heat supply system. *System Research in Energy*. 2023. No. 1. P. 80–87. DOI: 10.15407/srenergy2023.01.080.
14. Костенко Г., Згуровець О. Сучасний стан та перспективи розвитку відновлюваної розподіленої генерації в Україні. *Системні дослідження в енергетиці*. 2023. № 2. С. 4–17. DOI: 10.15407/srenergy2023.02.004.
15. Babak V., Kulyk M. Development of the New Electro-thermal Energy System Structure for Providing of Ukraine's Energy Market Profitability. In: Zaporozhets, A. (eds). *Systems, Decision and Control in Energy V. Studies in Systems, Decision and Control*. 2023. Vol. 481. P. 3–27. DOI: 10.1007/978-3-031-35088-7_1.
16. Вовчак В.В., Тесленко О.І., Самченко О.П., Сушкова Д.Є. Кращі з доступних технологій для житлово-комунального господарства України. Керівництво з відбору технологій. Під ред. С. Єрмілова. Київ : Поліграф плюс, 2016. 134 с. — <https://saee.gov.ua/uk/pressroom/vydannya>
17. ДБН В.2.5-23:2010. Інженерне обладнання будинків і споруд. Проектування електрообладнання об'єктів цивільного призначення. Чинний з 01.10.2010 на зміну ДБН В.2.5-23:2003. Київ : Міністерство будівництва України, 2010. 169 с. — <https://dbn.co.ua/load/normativy/dbn/1-1-0-356>
18. ПУЕ-17 (Правила улаштування електроустановок). Чинний з 21.08.2017 на заміну ПУЕ-86. Київ : Міненерговугілля України, 2017. 617 с. — <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0476732-17#Text>
19. Container Cogeneration Plant. *MWM Compact Modules*. — <https://www.mwm.net/en/distributed-power-plants/container-cogeneration-plant/>
20. Gas Engines. Jenbacher. — <https://www.jenbacher.com/en/gas-engines>
21. Про теплопостачання : Закон України. Розділ І. Загальні положення. Стаття 1. Визначення термінів. Редакція від 01.05.2019. — <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2633-15#Text>
22. Про основні показники роботи опалювальних котелень і теплових мереж в Україні за 2014 рік. *Статистичний бюлетень*. Київ : Державна служба статистики України, 2015. 17 с. — https://ukrstat.gov.ua/druk/publicat/Arhiv_u/05/Arch_tep_bl.htm
23. Про основні показники роботи опалювальних котелень і теплових мереж в Україні за 2013 рік. *Статистичний бюлетень*. Київ : Державна служба статистики України, 2014. 21 с. — https://ukrstat.gov.ua/druk/publicat/Arhiv_u/05/Arch_tep_bl.htm
24. Гольстрем В.А., Кузнецов Ю.Л. Довідник з економії паливно-енергетичних ресурсів. Київ : Техніка, 1985. 383 с.
25. Звіт з оцінки відповідності (достатності) генеруючих потужностей — 2020. Укренерго. — <https://ua.energy/wp-content/uploads/2020/11/MAF-UA-2020-v1.pdf>
26. IRENA. (2023). *World Energy Transitions Outlook 2023: 1.5 °C Pathway*. Volume 1. International Renewable Energy Agency. — <https://www.irena.org/Publications/2023/Jun/World-Energy-Transitions-Outlook-2023>
27. IRENA. (2020). *Global Renewables Outlook: Energy transformation 2050* (Edition: 2020). International Renewable Energy Agency. — <https://www.irena.org/Publications>
28. European Commission, REPowerEU Plan, 2022. — <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/HTML/?uri=CELEX:52022DC0230&from=EN>
29. Susana Paardekooper. *Heat Roadmap Europe — a Vision for 2050*. Brussels, February 13, 2019. — https://heatroadmap.eu/wp-content/uploads/2019/04/Susana-Paardekooper_Aalborg-University.pdf
30. Басок Б.І., Дубовський С.В., Пастушенко Е.П., Нікітін Є.Є., Базєєв Є.Т. Теплові насоси як тренд низьковуглецевого розвитку енергетики. *Енерготехнології та ресурсозбереження*. 2023. № 2. С. 23–44. DOI: 10.33070/etars.2.2023.02.
31. Derii V.O., Teslenko O.I., Sokolovska I.S. Methodical approach to estimating the potential of thermal energy production by heat pump plants in case of their implementation in regional district heating systems. *Енерготехнології та ресурсозбереження*. 2023. № 2. С. 44–56. DOI: 10.33070/etars.2.2023.03.

Надійшла до редакції 16.01.2024

Teslenko O.I., *Candidate of Technical Sciences, ORCID: 0000-0002-3772-5991*
General Energy Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine
172, Antonovycha Str., 03150 Kyiv, Ukraine, e-mail: teslenko1961@gmail.com

Energy Potential of Distributed Generation at Powerful Boiler Houses of Ukraine in Conditions of Military Aggression

Abstract. The Integrated Power System of Ukraine (IPS) is purposefully destroyed by the Russian aggressor and suffers significant damage, which has caused long-term emergency interruptions in the power supply of critical infrastructure facilities, enterprises and the population. One of the ways to increase the stability of the IPS of Ukraine is to increase the share of distributed generation in its composition. The conceptual idea of solving this problem is the transformation of existing critical infrastructure objects from electricity consumers into electricity producers/suppliers who will provide their own electricity needs and the needs of other electricity consumers. Boiler houses of centralized heat supply systems (DHS) of Ukrainian cities with their existing electric power and fuel infrastructure can become such objects in wartime conditions. The author proposes the widespread introduction of energy-efficient cogeneration gas-piston units (CGPUs) at boiler houses of the DHS. The container-type CGPU is a typical mass-produced equipment that is manufactured in Ukraine and abroad and has a short implementation period (up to 5 days from the date of delivery to the industrial site of the boiler house). The high maneuverability of the CGPUs allows for an increase in the flexibility of the IPS of Ukraine. The article presents the main technical and economic indicators of distributed generation with the use of CGPU at existing boiler houses for further national planning of the development of distributed generation during the martial law and post-war reconstruction of Ukraine. The application of CGPU at boiler houses of the DHS of Ukrainian cities has the potential to provide additional distributed generation with a total capacity of up to 2365.7 MW, in particular, 1224.8 MW at 158 boiler houses with a thermal capacity of 100 Gcal/h and more (612 CGPUs with an average unit electric power of 2.0 MW each); 561.9 MW at 409 boiler houses from 20 to 100 Gcal/h (803 CGPUs of 0.7 MW each); 561.9 MW in 2101 boiler houses from 3 to 20 Gcal/h (4136 CGPUs of 0.14 MW each). Under the conditions of 8 hours a day of use of the installed capacity of CGPUs, 567.8 thousand MWh of electricity will be produced every month at the boiler houses of the DHS (taking into account the consumption of the boiler houses for their own needs and release to the network to other consumers) and 136–142 million cubic meters of natural gas will be consumed. According to the average specific cost of modular CGPU (turnkey supply) from 800 to 950 USD/kW of installed electric capacity, capital costs for implementing the CGPUs with a total capacity of 2,365.7 MW will amount to USD 1.89–2.25 billion. *Bibl. 31, Fig. 3.*

Keywords: distributed generation, centralized heat supply system, boiler houses, cogeneration gas-piston plants.

References

1. Guan, F.H., Zhao, D.M., Zhang, X., Shan, B.T., and Liu, Z. (2009). Research on distributed generation technologies and its impacts on power system. *International Conference: Sustainable Power Generation and Supply SUPERGEN'09* (2009, May). *IEEE Xplore*. — DOI: 10.1109/SUPERGEN.2009.5348241.
2. Directive (EU) 2019/944 of the European Parliament and of the Council of 5 June 2019 on common rules for the internal market for electricity and amending Directive 2012/27/EU. — <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32019L0944>
3. [On Electricity Market: Law of Ukraine of 13.04.2017 No 2019-VIII]. *Vidomosti Verkhovnoi Rady. [The Official Bulletin of the Verkhovna Rada of Ukraine]*. 2017. No. 27–28. — <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2019-19#Text> (Ukr.)
4. Kyrylenko, O.V., and Prakhovnyk, A.V. (2010). [Energy of sustainable development: challenges and

ways of construction]. [*Proceedings of the Institute of Electrodynamics of NAS of Ukraine. Special issue*]. pp. 10–16. (Ukr.)

5. Kyrylenko, O.V., Pavlovskiy, V.V., and Lukianenko, L.M. (2011). [Technical aspects of adoption of distributed generation sources in electric mains]. *Tekhnichna elektrodynamika*. No. 1. pp. 46–53. — <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/61941> (Ukr.)

6. World Energy Trilemma 2017: Changing Dynamics-Using Distributed Energy Resources to Meet the Trilemma Challenge. — <https://www.worldenergy.org/publications/entry/world-energy-trilemma-2017-changing-dynamics-a-using-distributed-energy-resources-to-meet-the-trilemma-challenge>

7. Kyzym, M.O., Lelyuk, O.V., and Kostenko, D.M. (2018). [Assessment and diagnostics of the development of distributed generation in Ukraine]. *Problemy Ekonomiky. [The Problems of Economy]*. No. 4. pp. 79–92. DOI: 10.32983/2222-0712-2018-4-79-92. (Ukr.)

8. Nikitin, Ye.Ye., and Dutka, O.V. (2019). [The Complex Approach to the Modernization of Boilers, Heat Networks and Connected Buildings]. *Energotekhnologii i Resursosberezhenie. [Energy Technologies and Resource Saving]*. No. 2. pp. 16–23. DOI: 10.33070/etars.2.2019.03. (Ukr.)

9. Kolisnyk, M. (2023). [Distributed generation is an important element of the Integrated Power System of Ukraine]. Kyiv: [Ministry of Energy of Ukraine]. — <https://www.mev.gov.ua/novyna/rozpodilena-hene-ratsiya-vazhlyvyi-element-obyednanoyi-enerhetychnoyi-systemy-ukrayiny-mykola> (Ukr.)

10. Aliyeva, O. (2020). [Distributed renewable energy generation]. Heinrich Boll Stiftung. Kyiv-Ukraine Bureau. 10 p. — <https://rea.org.ua/wp-content/uploads/2020/11/aliyeva-181120.pdf> (Ukr.)

11. Zinchenko, A., Bondarchuk, I., and Khomenko, V. (2020). [Distributed energy resources and technologies]. *The UN Development Program in Ukraine*. 24 p. — https://www.undp.org/sites/g/files/zskgke326/files/migration/ua/WhiteBook_DERT_deployment_in_Ukraine.pdf (Ukr.)

12. Nikitin, E.E., and Komkov, I.S. (2022). An Integrated Approach to the Development of Plans for Transformation of Electrical and Heat Supply Systems. *Energotekhnologii ta Resursoberezhennya. [Energy Technologies and Resource Saving]*. No. 2. pp. 4–16. DOI: 10.33070/etars.2.2022.01.

13. Denysov, V. (2023). Efficiency of the renewable energy sources application for an autonomous heat supply system. *System Research in Energy*. No. 1. pp. 80–87. DOI: 10.15407/srenergy2023.01.080.

14. Kostenko, G., and Zgurovets, O. (2023). [Current state and prospects for development of renewable distributed generation in Ukraine]. *Sistemny doslidzhennya v energetytsy. [System Research in Energy]*. No. 2. pp. 4–17. DOI: 10.15407/srenergy2023.02.004. (Ukr.)

15. Babak, V., and Kulyk, M. (2023). Development

of the New Electro-thermal Energy System Structure for Providing of Ukraine's Energy Market Profitability. In: Zaporozhets, A. (eds.). *Systems, Decision and Control in Energy V. Studies in Systems, Decision and Control*. Vol. 481. pp. 3–27. DOI: 10.1007/978-3-031-35088-7_1.

16. Vovchak, V.V., Teslenko, O.I., Samchenko, O.P., and Sushkova, D.Ye. (2016). [The best available technologies for housing and communal services in Ukraine. Technology Selection Guide]. Ed. S. Yermilov. Kyiv: Polygraph Plus. 134 p. — <https://saee.gov.ua/uk/pressroom/vydannya> (Ukr.)

17. DBN V.2.5-23:2010. [Engineering equipment of houses and buildings. Design of electrical equipment of civil objects]. Kyiv : [Ministry of Regional Construction of Ukraine], 2010. 169 p. — <https://dbn.co.ua/load/normativy/dbn/1-1-0-356> (Ukr.)

18. PUE-17. [PUE — Rules for the arrangement of electrical installations]. Kyiv : [Ministry of Energy and Coal of Ukraine], 2017. 617 p. — <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0476732-17#Text> (Ukr.)

19. Container Cogeneration Plant. *MWM Compact Modules*. — <https://www.mwm.net/en/distributed-power-plants/container-cogeneration-plant/>

20. Gas Engines. Jenbacher. — <https://www.jenbacher.com/en/gas-engines>

21. [On Heat Supply: Law of Ukraine. Section I. General provisions. Article 1. Definition of terms. Editorial from 01.05.2019]. — <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2633-15#Text> (Ukr.)

22. [On the main indicators of the operation of heating boiler houses and heat networks in Ukraine for 2014]. *Statistichniy bulletin. [Statistical bulletin]*. Kyiv : [State Statistics Service of Ukraine], 2015. 17 p. — https://ukrstat.gov.ua/druk/publicat/Arhiv_u/05/Arch_tep_bl.htm (Ukr.)

23. [On the main indicators of the operation of heating boiler houses and heat networks in Ukraine for 2013]. *Statistichniy bulletin. [Statistical bulletin]*. Kyiv : [State Statistics Service of Ukraine], 2014. 21 p. — https://ukrstat.gov.ua/druk/publicat/Arhiv_u/05/Arch_tep_bl.htm (Ukr.)

24. Holstrem, V.A., and Kuznetsov, Yu.L. (1985). [Handbook on saving fuel and energy resources]. Kyiv : Tekhnika. 383 p. (Ukr.)

25. [Report on assessment of compliance (sufficiency) of generating capacities — 2020. Ukrenergo]. — <https://ua.energy/wp-content/uploads/2020/11/MAF-UA-2020-v1.pdf> (Ukr.)

26. IRENA. (2023). World Energy Transitions Outlook 2023: 1.5 °C Pathway. Volume 1. International Renewable Energy Agency. — <https://www.irena.org/Publications/2023/Jun/World-Energy-Transitions-Outlook-2023>

27. IRENA. (2020). Global Renewables Outlook: Energy transformation 2050 (Edition: 2020). International Renewable Energy Agency. — <https://www.irena.org/Publications>

28. European Commission, REPowerEU Plan, 2022. — <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/HTML/?uri=CELEX:52022DC0230&from=EN>

29. Susana Paardekooper. (2019). Heat Roadmap Europe — a Vision for 2050. Brussels, February 13, 2019. — https://heatroadmap.eu/wp-content/uploads/2019/04/Susana-Paardekooper_Aalborg-University.pdf

30. Basok, B.I., Dubovskyi, S.V., Pastushenko, E.P., Nikitin, E.E., and Bazeev, E.T. (2023). [Heat pumps as a trend of low-carbon energy development].

Energotechnologii ta Resursozberezhennya. [Energy Technologies and Resource Saving]. No. 2. pp. 23–44. DOI: 10.33070/etars.2.2023.02. (Ukr.)

31. Derii, V.O., Teslenko, O.I., and Sokolovska, I.S. (2023). Methodical approach to estimating the potential of thermal energy production by heat pump plants in case of their implementation in regional district heating systems. *Energotechnologii ta Resursozberezhennya. [Energy Technologies and Resource Saving]*. No. 2. pp. 44–56. DOI: 10.33070/etars.2.2023.03.

Received January 16, 2024

UDC 620.91

DOI: 10.33070/etars.1.2024.05

Mysak S.Y., *Candidate of Technical Sciences, ORCID: 0000-0003-2064-7015*,
Shapoval S.P., *Doctor of Technical Sciences, Professor*,
ORCID: 0000-0003-4985-0930, **Hyvliud A.M.**, *Candidate*
of Technical Sciences, ORCID 0000-0002-0122-882X

Lviv Polytechnic National University

12, Stepana Bandery Str., 79000 Lviv, Ukraine, e-mail: anna.m.hyvliud@lpnu.ua

Analysis of the Share of Renewable Energy Sources in the Gross Final Energy Consumption of European Countries

Abstract. This article provides an analysis of the shares of renewable energy sources in the gross final energy consumption for European countries over several years. The study encompasses various renewable energy sources, including overall solar energy, solar thermal and solar electricity individually, biomass, biofuels and waste, wind power, geothermal energy, hydropower, and heat pumps. The analysis was conducted for the Netherlands, Germany, France, Poland, and Ukraine. The article examines not only the actual data on the utilization of renewable energy sources in these countries but also analyzes their plans for further increasing their usage. The findings of the analysis are crucial for understanding the trends in renewable energy development in Europe and can serve as examples for other countries. The analyzed data includes historical figures as well as future projections. The collected graphical data illustrates the real achievements of countries in terms of renewable energy utilization, as well as their intentions and plans for the future. This information can serve as a valuable guidebook for those interested in renewable energy development and seeking to implement similar strategies. The final results of the research provide insights into the state of renewable energy development in Europe, highlighting the prospects and opportunities for further growth. The article emphasizes the significance of utilizing renewable energy sources as a path towards sustainable development and contributes to the dissemination of knowledge about them for other countries aiming to reduce their reliance on traditional energy sources and transition to more environmentally friendly alternatives. *Bibl. 37, Fig. 11.*

Keywords: decarbonization; greenhouse gases; energy and climate plan.