

УДК 697.3

Володимир Дерій, канд. техн. наук, ст. наук. співр., <https://orcid.org/0000-0002-5689-4897>
Інститут загальної енергетики НАН України, вул. Антоновича, 172, Київ, 03150, Україна
e-mail: derii.volodymyr@gmail.com

ГРАНИЧНІ МОЖЛИВОСТІ ЦЕНТРАЛІЗОВАНОГО ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ ЩОДО ВИКОРИСТАННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ВІДНОВЛЮВАНИХ ДЖЕРЕЛ

Анотація. У статті наведено результати дослідження щодо використання у централізованому теплопостачанні України електроенергії від сонячних та вітрових електростанцій для прямого її перетворення на теплову енергію за допомогою електричних теплогенераторів (електричних котлів та теплових насосів). Оцінено граничні можливості централізованого теплопостачання України щодо використання цієї теплової енергії, що і є метою даної роботи. Для проведення аналізу створена розрахункова модель, встановлені обмеження та розроблені методичні підходи щодо визначення необхідних вихідних даних. Дослідження проводилися для опалювального та неопалювального періодів. В неопалювальний період моделювалися чотири різні варіанти використання електроенергії від сонячних та вітрових електростанцій для перетворення її на теплову. Результати розрахунків показали, що станом на 2021 р. в опалювальний період потреби в тепловій енергії значно перевищують можливості її виробництва електричними теплогенераторами, які споживають електроенергію від сонячних та вітрових електростанцій. Граничним значенням є сумарна потужність сонячних та вітрових електростанцій близько 18500 МВт. В неопалювальний період вся електроенергія, вироблена сонячними та вітровими електростанціями, не може бути повністю спожита електричними теплогенераторами централізованого теплопостачання, оскільки виникне надлишок теплової енергії 1736,4 тис. МВт·год. Для акумуляції такого обсягу теплової енергії сезонними теплосмісними акумуляторами знадобиться 21,7 млн м³ води. За середнього об'єму сезонного акумулятора 60000 м³ їх знадобиться близько 360 штук. В умовах щільної забудови міських поселень побудувати таку кількість сезонних теплових акумуляторів малоймовірно. Найімовірнішим варіантом є часткове використання електроенергії від сонячних та вітрових електростанцій електричними теплогенераторами централізованого теплопостачання, електролізерами для виробництва водню та системами охолодження продуктів. При цьому разом з електричними теплогенераторами працюватимуть опалювальні котли на вичерпаному паливі, що забезпечить надійність теплопостачання.

Ключові слова: сонячні електростанції, вітрові електростанції, централізоване теплопостачання, електричні теплогенератори, електроенергія, теплова енергія, тепловий акумулятор.

1. Вступ

Процеси декарбонізації світової економіки стали драйвером бурхливого розвитку сонячних (СЕС) та вітрових (ВЕС) електростанцій. У свою чергу, непередбачуваність потужності генерації СЕС та ВЕС викликала численні проблеми для енергосистем у всьому світі, вирішенню яких присвячено ряд публікацій, наприклад [1–7].

В роботах [1–3] аналізується застосування споживачів-регуляторів у вигляді електричних теплогенераторів для регулювання частоти та потужності Об'єднаної енергосистеми (ОЕС) України. У дослідженні [4] розглядається питання створення ефективної системи регулювання частоти з використанням акумуляторних накопичувачів електроенергії та різних типів систем регулювання. Їх ефективність оцінювалася за максимальним відхиленням частоти та тривалості перехідного процесу.

В роботі [5] проблеми, зумовлені стохастичними режимами роботи СЕС та ВЕС, пропонується вирішити за допомогою накопичувачів електроенергії. У дослідженні [6] авторами запропоновано математичну модель, яка дозволяє оцінити умови, за яких розподілена генерація стає самодостатньою. В роботі [7] вказується на поточний загрозливий стан Об'єднаної енергосистеми, зумовлений, на думку авторів, неконтрольованим розвитком СЕС та ВЕС у структурі ОЕС України. Наводяться збитки енергоринку, спричинені цим. Для вирішення проблеми пропонується створити електротеплову систему, в якій основний обсяг виробленої електричної енергії СЕС та ВЕС буде спожито електрокотлами системи централізованого теплопостачання (СЦТ), що, за оцінками авторів, також забезпечить зменшення викидів парникових газів, високу технологічність, надійність та економічність.

У статті [8] зазначається, що стохастичний характер роботи частини відновлюваних джерел енергії вимагає удосконалення не лише технологій, які вони використовують, а й способів управління ними. Для підвищення ефективності роботи енергосистем у статті пропонується використовувати підхід, заснований на логіці домінування послуг шляхом здійснення більш тісної сервісної взаємодії між учасниками енергетичних ринків.

Автору даної статті невідомі роботи, в яких досліджувалися граничні можливості централізованого теплопостачання щодо перетворення електроенергії, виробленої СЕС та ВЕС, на теплову.

Метою даного дослідження є оцінка граничних можливостей централізованого теплопостачання України щодо перетворення електричної енергії від вітрових та сонячних електростанцій на теплову енергію.

Постановка завдання. Через відсутність у відкритих джерелах необхідної інформації для досягнення поставленої мети потрібно вирішити наступні завдання для кожного місяця вибраного календарного року:

1. Визначити частку відпуску теплової енергії СЦТ від загального обсягу та обсяг її генерації;
2. Побудувати структуру генерації та визначити, яка частка виробленої теплової енергії та якими джерелами може бути заміщена тепловою енергією, виробленою електрокотлами СЦТ, які споживають електроенергію від СЕС та ВЕС;
3. Побудувати графіки теплових навантажень СЦТ для опалювального та неопалювального періодів;
4. Створити розрахункову модель для визначення кількості відпущеної електричної енергії ВЕС та СЕС України та перетворення її на теплову;
5. Визначити обмеження на заміщення теплової енергії від традиційних теплогенераторів на теплову енергію від електричних теплогенераторів (ЕТГ);
6. Виконати розрахунки та провести порівняльний аналіз.

2. Методи та матеріали

Частка СЦТ у відпуску теплової енергії. В літературі [9] доступна інформація щодо відпуску теплової енергії за 2016–2020 роки. За цими даними в табл. 1 наведені показники щодо відпуску теплової самостійними котельнями, ТЕС, ТЕЦ, АЕС, підприємствами теплових мереж, іншими підприємствами, організаціями, установами, що мають котельні, теплові мережі, окремі котли, інші джерела теплопостачання. У групу «інші теплогенератори» входять електрокотли, теплові насоси, теплоутилізатори.

Таблиця 1. Відпуск теплової енергії тепловими джерелами у 2016–2020 рр.

Рік	2016	2017	2018	2019	2020
Відпуск теплової енергії, тис. Гкал	98956	93293	97794	91009	86954

Як видно з табл. 1, зміна відпуску теплової енергії за роками має загальну тенденцію (за винятком 2018 р.) до зменшення (в середньому 5,7 % на рік), що зумовлено процесами децентралізації (особливо в постачанні гарячої води) та зміною клімату (потеплінням).

Для проведення подальшого аналізу виберемо 2021 рік. У цьому році була максимальна встановлена потужність СЕС та ВЕС, яка, за даними компанії НЕК «Укренерго», становила 6226,9 МВт та 1673 МВт відповідно [10]. Відповідно до даних табл. 1 та середніх темпів падіння відпуску теплової енергії (5,7 % на рік) оцінено, що у 2021 р. було відпущено 81997,6 тис. Гкал. До наведеної величини входить тепла енергія, яку відпускають на потреби населення, комунально-побутові та виробничі потреби, частка яких, за різними джерелами, становить 30–35 % [11, 12] (для подальших розрахунків прийнято 30 %). Тоді на потреби теплопостачання населення та комунально-побутові потреби було відпущено 57398,3 тис. Гкал. Такий обсяг теплової енергії був відпущений всіма системами теплопостачання: автономними (до 1 Гкал/год), децентралізованими (1–3 Гкал/год), помірно-централізованими (3–20 Гкал/год, магістральні мережі) централізованими (> 20 Гкал/год, магістральні мережі). Зважаючи на наявність процесів децентралізації та наведені у [13, 14] дані, було встановлено, що частка автономних та децентралізованих систем теплопостачання в загальному відпуску теплової енергії становить близько 12 %, а помірно-централізованих та централізованих – 88 %, що дорівнює 50510,5 тис. Гкал. Враховуючи, що втрати в теплових мережах становлять близько 18 % [14, 15], загальний обсяг споживання теплової енергії можна визначити за виразом

$$Q_{cn} = Q_v (1 - Q_{vt} / 100), \quad (1)$$

де Q_{cn} – кількість спожитої теплової енергії; Q_v – кількість відпущеної теплової енергії; Q_{vt} – втрати теплової енергії в мережах, %.

Розрахунки за виразом (1) показали, що у 2021 р. споживання теплової енергії від СЦТ становило 41418,6 тис. Гкал (фактичні дані для 2015 р. – 49,8 млн Гкал [16]). Це свідчить про те, що процеси децентралізації продовжуються.

Для визначення необхідного обсягу виробництва теплової енергії ЦТ, на основі даних [9, 13], було зроблено припущення, що середні витрати теплової енергії на власні потреби всіх джерел у 2021 р. становили 2,2 %. Тоді обсяг виробництва (генерації) теплової енергії можна визначити за виразом

$$Q_z = \frac{Q_v}{1 - Q_{vn} / 100}, \quad (2)$$

де Q_z – кількість виробленої теплової енергії; Q_v – кількість відпущеної теплової енергії; Q_{vn} – витрати теплової енергії на власні потреби, %.

Розрахунки показали, що обсяг генерації теплової енергії у 2021 р. становив 51965,6 тис. Гкал.

Структура генерації СЦТ. Для побудови структури генерації теплової енергії СЦТ було проаналізовано щомісячний відпуск теплової енергії ТЕЦ, ТЕС, АЕС, які утворюють місцеві СЦТ або входять до них, за 2014–2018 роки [17, 18]. Для подальших розрахунків було зроблено припущення, що станом на 2021 р. ТЕЦ, ТЕС, АЕС відпустили кількість теплової енергії, яка дорівнює їх середнім значенням за 2014–2018 роки, а саме: ТЕЦ – 19474,5 тис. Гкал, ТЕС – 1288,7 тис. Гкал, АЕС – 1525,7 тис. Гкал. Враховуючи витрати теплової енергії на власні потреби (2,2 %), виробництво теплової енергії ТЕЦ, ТЕС, АЕС становило 19912,6 тис. Гкал, 1317,7 тис. Гкал, 1560 тис. Гкал відповідно.

Зробивши припущення, що виробництво теплової енергії «іншими» теплогенераторами становить 2 % [16] (1039,3 тис. Гкал), можна визначити кількість теплової енергії, виробленої котельнями, за виразом

$$Q_k = Q_z - Q_{ТЕЦ} - Q_{ТЕС} - Q_{АЕС} - Q_{IH}, \quad (3)$$

де Q_k , Q_z , $Q_{ТЕЦ}$, $Q_{ТЕС}$, $Q_{АЕС}$ – виробництво теплової енергії котельнями, всіма джерелами, ТЕЦ, ТЕС, АЕС, «іншими» джерелами відповідно.

Результат розрахунку показав, що котельні у 2021 р. виробили 28136 тис. Гкал (54 %). Тоді структура генерації СЦТ буде такою, як показано на рис. 1.

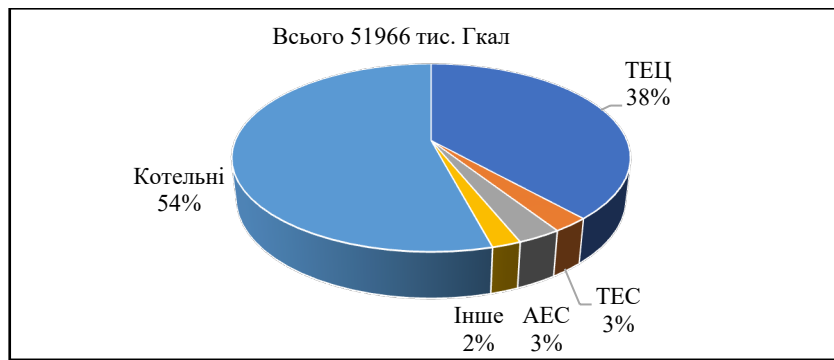


Рисунок 1. Структура генерації теплової енергії СЦТ у 2021 р.

Графіки теплових навантажень СЦТ. Для побудови графіків теплових навантажень було проведено аналіз доступної інформації щодо відпусків теплової енергії від ТЕЦ за місяцями у період 2014–2018 рр. [16, 17]. Аналіз показав, що в середньому в неопалювальний період ТЕЦ відпускали 15,1 % теплової енергії від сумарного річного обсягу. Зазвичай ця частка відпуску в більшості випадків становила 25 %, але масштабні процеси децентралізації, особливо в системах постачання гарячої води, призвели до суттєвого її зменшення. Спираючись на наведені в [17] дані, для кожного місяця року була визначена частка відпуску теплової енергії від ТЕЦ (табл. 2).

Таблиця 2. Частки відпуску теплової енергії від ТЕЦ

Місяць	січень	лютий	березень	квітень	травень	червень	липень	серпень	вересень	жовтень	листопад	грудень
Частка відпуску теплової енергії, %	19.0	15.7	15.0	5.0	2.5	1.9	2.1	1.6	1.9	5.8	14.6	14.9

Цей розподіл було застосовано для розрахунку часток відпуску теплової енергії від котелень та «інших» джерел, що дало змогу побудувати сумарний графік виробництва теплової енергії від СЦТ, наведений на рис. 2.

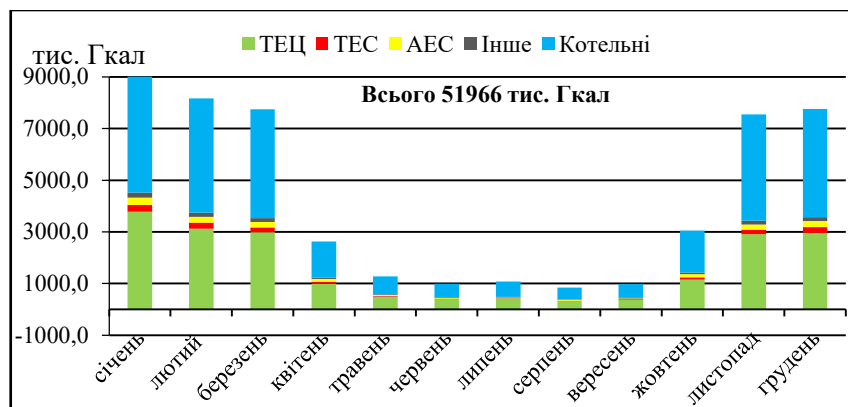


Рисунок 2. Розрахунковий графік виробництва теплової енергії СЦТ у 2021 р.

Розрахункова модель. Доступна на сайті НЕК «Укренерго» інформація щодо СЕС та ВЕС наведена у вигляді встановлених потужностей, які на кінець 2021 р. становили 6226,2 МВт та 1529 МВт відповідно (7755,2 МВт разом), та потужностей генерації електроенергії з дискретністю 1 година. Фактично, це потужність в останню хвилину даної години. Як змінювалася потужність СЕС та ВЕС протягом інтервалу дискретизації невідомо, тому для зменшення її невизначеності використовувалося ковзаюче середнє значення потужності двох сусідніх інтервалів. Тоді обсяг теплової енергії, виробленої

електричними теплогенераторами, які споживають згенеровану СЕС або ВЕС електроенергію за j -й місяць, може бути розрахований за формулою

$$E_j = \sum_n \sum_i \left(\frac{P_i + P_{i+1}}{2} \right) \cdot \tau, \quad (4)$$

де E_j – обсяг виробленої СЕС або ВЕС електричної енергії за j -й місяць; n – кількість діб у місяці j ; i – кількість інтервалів дискретизації τ за добу; P_i – потужність СЕС або ВЕС в кінці інтервалу i в j -й місяць; P_{i+1} – потужність СЕС або ВЕС в кінці інтервалу $i+1$ в j -й місяць; τ – інтервал дискретизації.

Обсяг виробленої електричними теплогенераторами теплової енергії розраховувався за виразом

$$Q_j = k \sum_{\gamma} E_{\gamma j} k_{\gamma}, \quad (5)$$

де Q_j – обсяг виробленої теплової енергії за j -й місяць, Гкал; k – коефіцієнт пропорційності між МВт·год та Гкал; $E_{\gamma j}$ – спожита електрична енергія в місяці j від СЕС та ВЕС γ -им ЕТГ; k_{γ} – коефіцієнт перетворення γ -го ЕТГ.

Комп'ютерна реалізація розрахункової моделі була виконана в програмному середовищі Excel.

Обмеження на заміщення теплової енергії від традиційних теплогенераторів на теплову енергію від ЕТГ. Для подальшого аналізу було зроблено припущення, що, незважаючи на значні руйнування теплових електростанцій та окупацію частини території України, після закінчення війни захоплені території будуть повернуті, а ТЕЦ і ТЕС відновлені із застосуванням сучасних когенераційних технологій. Зазначені електростанції візьмуть на себе постачання теплової енергії споживачам (44 %). У такому разі замінити теплову енергію, вироблену із застосуванням нових когенераційних технологій, іншими джерелами не має ніякого сенсу, тому що електрична енергія не вироблятиметься (або вироблятиметься з низьким коефіцієнтом використання палива). В категорії «Інші» теплогенератори виробництва теплової енергії (2 %) пов'язане із технологічними процесами та підвищенням енергоефективності.

Таким чином, заміщення теплової енергії, виробленої електричними теплогенераторами, які живляться від електроенергії СЕС та ВЕС, доцільно тільки в котельнях. Річний обсяг цієї енергії становить 28136 тис. Гкал або 32722,2 тис. МВт·год.

Результати розрахунків та порівняльного аналізу. Для проведення розрахунків було прийнято, що тривалість опалювального періоду становить 182 доби – від 15 жовтня до 15 квітня. За ЕТГ взято електрокотли, їх коефіцієнт перетворення прийнятий 0,98. Результати розрахунку виробництва електричної енергії СЕС та ВЕС отримано за формулою (4) і наведено в табл. 3, а виробленої з неї теплової енергії – за формулою (5), рис. 3. Також для порівняння наведено виробництво теплової енергії котельнями СЦТ за місяцями.

Таблиця 3. Розрахункове виробництво електричної енергії СЕС та ВЕС у 2021 р., тис. МВт·год

Місяць	Січень	Лютий	Березень	Квітень	Травень	Червень	Липень	Серпень	Вересень	Жовтень	Листопад	Грудень	Всього
СЕС	126,8	230,2	432,3	484,6	591,5	672,4	842,7	766,3	572,8	526,5	261,6	79,4	5587,1
ВЕС	365,0	317,4	317,6	232,8	237,1	207,8	227,0	249,3	293,5	450,1	359,0	451,7	3708,1
Разом	491,8	547,6	749,9	717,4	828,6	880,2	1069,7	1015,6	866,2	976,6	620,6	531,0	9295,2

Як видно з рис. 3, в опалювальний період (жовтень – квітень) потреби в тепловій енергії від котелень значно перевищують можливості виробництва теплової енергії електрокотлами (мінімум у два рази – квітень, жовтень), які споживають електроенергію від СЕС та ВЕС, за їх встановленої потужності станом на 2021 р. (7900 МВт разом). Як відомо [19–23], в планах розвитку енергетики в Україні передбачалося до 2030 р. довести встановлені потужності СЕС та ВЕС до 12200 МВт та 6314 МВт

відповідно (18514 МВт разом), тобто збільшити їх сумарну встановлену потужність у 2,3 раза. А це означає, що і в опалювальний період 2030 р. СЦТ зможуть повністю використати теплову енергію, вироблену електрокотлами, які споживатимуть електроенергію від СЕС та ВЕС. Фактично, це граничне значення встановленої потужності СЕС та ВЕС для повного споживання виробленої електрокотлами СЦТ електроенергії для опалювальних місяців квітня та жовтня. В інші місяці резерв все ще існує.

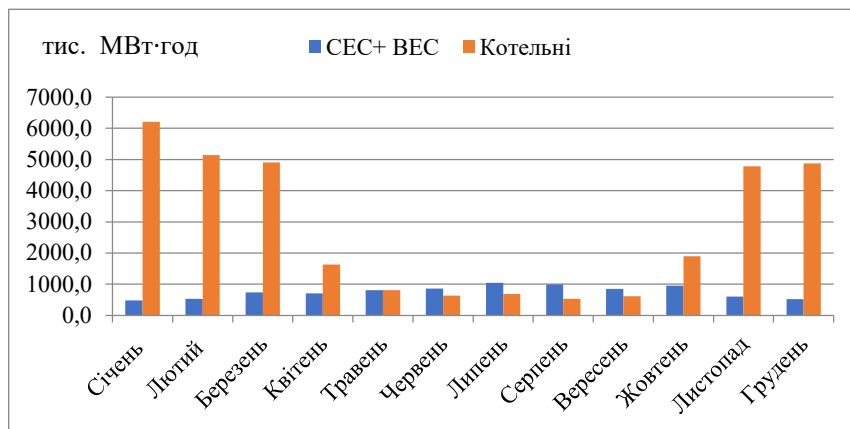


Рисунок 3. Розрахункове виробництво теплової енергії котельнями СЦТ та електрокотлами

В неопалювальний період ситуація діаметрально протилежна – надлишок теплової енергії від електрокотлів. Було проаналізовано чотири можливі варіанти: варіант 1 передбачає, що вся електрична енергія, яку вироблятимуть СЕС та ВЕС, буде спожита ЕТГ та перетворена на теплову; варіант 2 – перетворена на теплову енергію буде тільки електроенергія, вироблена СЕС; варіант 3 – перетворена на теплову енергію буде тільки електроенергія, вироблена ВЕС; варіант 4 передбачає, що тільки надлишкова електрична енергія, вироблена СЕС та ВЕС протягом неопалювального сезону за допомогою електрокотлів, перетворюється на теплову. За розрахунком показників у 4 варіанті було зроблено припущення, що кожного місяця в неопалювальний період надлишок електроенергії від СЕС та ВЕС становитиме 30 %.

3. Результати розрахунків варіантів використання електроенергії від СЕС та ВЕС для перетворення її на теплову енергію за наведеними вище формулами показані в табл. 4.

Таблиця 4. Результати розрахунку варіантів перетворення електроенергії від СЕС та ВЕС на теплову

Місяць	Потреби в ТЕ	Теплова енергія, тис. МВт·год											
		Варіант 1 (СЕС+ВЕС)			Варіант 2 (СЕС)			Варіант 3 (ВЕС)			Варіант 4 (надлишкова ЕЕ)		
		ТЕ від ЕТГ	надл. ТЕ	ТЕ від котлів	ТЕ від ЕТГ	надл. ТЕ	ТЕ від котлів	ТЕ від ЕТГ	надл. ТЕ	ТЕ від котлів	ТЕ від ЕТГ	надл. ТЕ	ТЕ від котлів
Квітень*	702.3	351.5	0	350.7	242.3	0	460.0	116.4	0	585.9	105.5	0	596.8
Травень	697.6	812.1	114.4	0	591.5	0	106.1	237.1	0	460.5	243.6	0	454.0
Червень	545.6	862.6	317.0	0	672.4	126.8	0.0	207.8	0	337.8	258.8	0	286.8
Липень	594.9	1048.3	453.4	0	842.7	247.8	0.0	227.0	0	367.9	314.5	0	280.4
Серпень	461.3	995.3	533.9	0	766.3	305.0	0.0	249.3	0	212.1	298.6	0	162.7
Вересень	531.3	848.9	317.7	0	572.8	41.5	0.0	293.5	0	237.8	254.7	0	276.6
Жовтень*	814.3	478.5	0	335.8	263.2	0	551.1	225.1	0	589.3	143.6	0	670.8
Всього	4347.3	5397.1	1736.4	686.5	3951.3	721.1	1117.1	1556.0	0	2791.2	1619.1	0	2728.1

Примітка 1. * з 1 до 15 квітня.

Примітка 2. ** з 15 до 31 жовтня.

Примітка 3. ТЕ – теплова енергія.

Примітка 4. надл. - надлишкова

4. Обговорення

Варіант 1. Як видно з табл. 4, частина теплової енергії, вироблена електростанціями, які живляться від СЕС та ВЕС, є надлишковою – 1736,4 тис. МВт·год. Відповідно, її необхідно або акумулювати, або обмежити виробництво електричної енергії СЕС та ВЕС на 1771,8 тис. МВт·год (враховано ККД електростанцій). При цьому вартість втраченої електроенергії становитиме близько 160 млн євро за неопалювальний період.

Для визначення необхідного об'єму сезонних акумуляторів зробимо наступні припущення, а саме:

- це буде теплоємнісна акумуляція, і в якості робочої речовини в акумуляторах використовуватиметься вода (найбільш поширені).

- температура води буде змінюватися від 15 °С до 95 °С.

За інформацією, наведеною у [24], питома теплоємність такого акумулятора становитиме 80 кВт·год/м³. Для акумуляції 1736,4 тис. МВт·год теплової енергії сезонними акумуляторами знадобиться 21,7 млн м³ води. За середнього об'єму сезонного акумулятора 60000 м³ (типовий для європейських країн) їх знадобиться близько 360 штук. В умовах щільної забудови міських поселень побудувати таку кількість сезонних теплових акумуляторів малоймовірно.

Крім того, така структура не може забезпечити необхідну надійність теплопостачання за винятком квітня та жовтня, коли працюватимуть газові котли, теплові насоси, котли на біомасі.

Варіант 2 має такі ж проблеми щодо надлишкової теплової енергії, як і перший. Хоча потреби в акумуляції менші у 2,4 раза, але все ще значні. Крім того, тільки впродовж трьох місяців (квітень, травень та жовтень) забезпечується надійне теплопостачання завдяки роботі штатних котлів котельень.

Варіант 3. За встановлених потужностей ВЕС станом на 2021 р. (1529 МВт) вся вироблена електроенергія в неопалювальний період може бути перетворена електростанціями СЦТ та спожита на потреби ГВП. При цьому СЦТ забезпечуватимуть надійність теплопостачання завдяки роботі котлів котельень без необхідності використання сезонних акумуляторів теплової енергії.

Варіант 4. Аналіз результатів розрахунку показав, що СЦТ зможуть без проблем спожити в неопалювальний період практично всю надлишкову електроенергію від СЕС та ВЕС, перетворюючи її електростанціями на теплову без потреби в акумуляції та з високою надійністю теплопостачання.

В результаті аналізу розрахунків за чотирма варіантами, було розглянуто ще два можливих варіанти (5 та 6). П'ятий варіант, який доповнює перший, передбачає, що частина електроенергії, яка мала перетворитись на теплову, подається на електролізери для виробництва водню. І тоді немає необхідності у будівництві сезонних акумуляторів теплової енергії (або ж їх частини). Можливо також застосування технології криогенного накопичення електроенергії [25, 26]. Розподіляючи належним чином електроенергію від СЕС та ВЕС між електростанціями, електролізерами та іншими технологіями її перетворення та зберігання, можна уникнути примусового обмеження їх потужності і тим самим значно підвищити енергоефективність.

Шостий варіант (доповнений варіант 3) передбачає використання електроенергії від ВЕС для теплопостачання цілий рік. А від СЕС – для холодопостачання в неопалювальний період із застосуванням вже існуючих систем охолодження, які виконуватимуть також функції теплових акумуляторів, наприклад складів для зберігання охолоджених продуктів. Суть ідеї полягає в тому, що під час надлишку електричної енергії в мережі холодильники споживають її більше, знижуючи на декілька градусів температуру продуктів, які в них зберігаються. За високого електричного навантаження холодильники відключаються від мережі до того часу, поки температура в них не підвищиться до заданої величини [27]. Шостий варіант привабливий тим, що характер зміни потреб у споживанні електроенергії електричними теплогенераторами співпадає зі зміною виробництва електричної енергії ВЕС та СЕС. В опалювальний період, коли потреби в теплоті великі, ВЕС виробляють електричної енергії більше, а в неопалювальний – потреби в гарячій воді менші – ВЕС виробляють менше електроенергії. Потреби в електроенергії холодильних установок у теплу пору року більші – СЕС теж виробляють більше електроенергії, і навпаки.

5. Висновки

1. Проведений аналіз показав, що в опалювальний період станом на 2021 р. вся електроенергія, вироблена СЕС та ВЕС, могла бути перетворена на теплову електрокотлами централізованого теплопостачання та спожита на потреби опалення та постачання гарячої води. Граничним значенням сумарної потужності сонячних та вітрових електростанцій, електроенергія від яких може бути перетворена на теплову централізованим теплопостачанням, є близько 18500 МВт.

2. В неопалювальний період вся електроенергія, вироблена СЕС та ВЕС, не може бути повністю спожита електрокотлами централізованого теплопостачання через надлишок теплової енергії 1736,4 тис. МВт-год. Для акумуляції такого обсягу теплової енергії сезонними акумуляторами знадобиться 21,7 млн м³ води. За середнього об'єму сезонного акумулятора 60000 м³ їх знадобиться близько 360 штук. В умовах щільної забудови міських поселень побудувати таку кількість сезонних теплових акумуляторів малоймовірно.

3. Найімовірнішим варіантом є часткове використання електроенергії СЕС та ВЕС електрокотлами централізованого теплопостачання, системами охолодження продуктів, електролізерами та іншими технологіями її перетворення та зберігання. При цьому централізоване теплопостачання зможе забезпечити надійність та безперебійність роботи.

Посилання

1. Babak V.P., Kulyk M.M. Possibilities and Perspectives of the Consumers-Regulators Application in Systems of Frequency and Power Automatic Regulation. *Technical Electrodynamics*. 2023. No. 4. P. 72–80. <https://doi.org/10.15407/techned2023.04.072>
2. Кулик М.М. Техніко-економічні аспекти використання споживачів-регуляторів у системах автоматичного регулювання частотою і потужністю. *Проблеми загальної енергетики*. 2015. Вип. 1(40). С. 20–28. <https://doi.org/10.15407/pge2015.01.020>
3. Derii V., Teslenko O., Lenchevsky E., Denisov V., Maistrenko N. Prospects and energy-economic indicators of heat energy production through direct use of electricity from renewable sources in modern heat generators. *Systems, Decision and Control in Energy IV*. 2023. Vol. 454. P. 451–463. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-22464-5_27
4. Zgurovets O., Kulyk M. Application of energy storage for automatic load and frequency control. In O. Kyrylenko, S. Denysiuk, D. Derevianko, I. Blinov, I. Zaitsev, A. Zaporozhets (Eds.). *Power Systems Research and Operation. Studies in Systems, Decision and Control*. 2023. Vol. 220. P. 75–85. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-17554-1_4
5. Hotra O., Kulyk M., Babak V., Kovtun S., Zgurovets O., Mroczka J., Kisała P. Organisation of the Structure and Functioning of Self-Sufficient Distributed Power Generation. *Energies*. 2024. Vol. 17. Iss. 1. <https://doi.org/10.3390/en17010027>
6. Zaporozhets A., Kostenko G., Zgurovets O., Deriy V. Analysis of Global Trends in the Development of Energy Storage Systems and Prospects for Their Implementation in Ukraine. In O. Kyrylenko, S. Denysiuk, R. Strzelecki, I. Blinov, I. Zaitsev, A. Zaporozhets (Eds.). *Power Systems Research and Operation. Studies in Systems, Decision and Control*. 2024. Vol. 512. P. 69–87. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-44772-3_4
7. Babak V.P., Kulyk M.M. Increasing the Efficiency and Security of Integrated Power System Operation Through Heat Supply Electrification in Ukraine. *Science and Innovation*. 2023. Vol. 19. No. 5. P. 100–116. <https://doi.org/10.15407/scine19.05.100>
8. Bielokha H., Chupryna L., Denisyuk S., Eutukhova T., Novoseltsev O. Hybrid Energy Systems and the Logic of Their Service-Dominant Implementation: Screening the Pathway to Improve Results. *Energy Engineering*. 2023. Vol. 120. No. 6. P. 1307–1323. <https://doi.org/10.32604/ee.2023.025863>
9. Постачання та використання енергії. *Державна служба статистики*. URL: <https://ukrstat.gov.ua/> (дата звернення 23.10.2024).
10. Інтеграція ВДЕ в енергосистему України. *Укренерго*. URL: <https://ua.energy/zagalni-novyny/u-2020-rotsi-vstanovlena-potuzhnist-ves-ta-ses-zroslo-na-41-a-yihnya-chastka-u-strukturi-vyrobnytstva-elektroenergiyi-vdvichi/> (дата звернення: 03.06.2020).
11. Теплопостачання. *Вікіпедія*. URL: <https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A2%D0%B5%D0%BF%D0%BB%D0%BE%D0%BF%D0%BE%D1%81%D1%82%D0%B0%D1%87%D0%B0%D0%BD%D0%BD%D1%8F> (дата звернення: 18.04.2024).
12. Кузін М. Оперативна оцінка руйнувань та економічних втрат у секторі централізованого теплопостачання, спричинених російською агресією в Україні. *Вокс Україна*. 18 Жовтня 2022. URL: <https://voxukraine.org/operatyvna-otsinka-rujnuvan-ta-ekonomichnyh-vtrat-u-sektori-tsentralizovanogo-teplopostachannya-sprychynenyh-rosijskoju-agresiyeyu-v-ukrayini> (дата звернення: 18.04.2024).

13. Про основні показники роботи опалювальних котелень і теплових мереж в Україні. Державна служба статистики України. *Статистичні бюлетені за 2005–2014 рр.* URL: https://ukrstat.gov.ua/druk/publicat/Arhiv_u/05/Arch_tep_bl.htm (дата звернення: 24.10.2023).
14. Дерій В.О. Можливості впровадження електричних теплогенераторів в системах централізованого теплопостачання України. *Проблеми загальної енергетики*. 2017. Вип. 3(50). С. 50–59. <https://doi.org/10.15407/pge2017.03.050>
15. Національний план з енергетики та клімату України 2025–2030 [проект]. URL: <https://www.me.gov.ua/Documents/Download?id=e79ecda3-f092-4d36-b600-21083ee61fa8> (дата звернення: 23.10.2024).
16. Децентралізоване опалення в Україні: потенціал та шляхи впровадження. Березень 2017. Звіт підготовлено в рамках проекту «Секретаріат та Експертний хаб з енергоефективності», що впроваджується Програмою розвитку ООН в Україні за підтримки Уряду Словацької Республіки та сприянням Міністерства регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства в Україні. URL: <https://www.minregion.gov.ua/wp-content/uploads/2017/03/Detsentralizovane-opalennya.-Potentsial-ta-shlyahi-vprovadzhennya.pdf> (дата звернення: 17.10.2022).
17. Інформація про відпуск теплової енергії енергетичними компаніями України. *Енергобізнес*, 2014–2018.
18. Державна служба статистики. *Статистика енергетики за 2018 рік*. URL: https://ukrstat.gov.ua/operativ/infografika/2020/energ/energ_2018.pdf (дата звернення: 14.02.2024).
19. Розвиток відновлюваних джерел енергії в Україні. Березень 2017. Звіт підготовлено в рамках проекту «Секретаріат та Експертний хаб з енергоефективності», що впроваджується Програмою розвитку ООН в Україні за підтримки Уряду Словацької Республіки та сприянням Міністерства регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства в Україні. URL: <https://www.minregion.gov.ua/wp-content/uploads/2017/03/Rozvitok-VDE-v-Ukrai--ni.pdf> (дата звернення: 14.02.2021).
20. Національний план з енергетики та клімату України 2025–2030 рр. (проект). *Сайт Міністерства економіки України*. URL: <https://www.me.gov.ua/Documents/Download?id=e79ecda3-f092-4d36-b600-21083ee61fa8> (дата звернення: 28.04.2024).
21. Про Національний план дій з відновлюваної енергетики на період до 2030 року. *Сайт Держенергоефективності*. URL: <https://saec.gov.ua/uk/content/elektronni-consultatsii> (дата звернення: 28.04.2024).
22. Про затвердження Національного плану дій з відновлюваної енергетики на період до 2030 року та плану заходів з його виконання: розпорядження Кабінету Міністрів України від 13 серпня 2024 р. № 761-р. URL: <https://www.kmu.gov.ua/npas/pro-zatverdzhennia-natsionalnoho-planu-dii-z-vidnovliuvanoi-enerhetyky-na-p-a761> (дата звернення: 17.09.2024).
23. Національний план дій з відновлюваної енергетики на період до 2030 року. URL: <https://chamber.ua/ua/news/uriad-ukrainy-zatverdvy-natsionalnyy-plan-diy-z-vidnovliuvanoi-enerhetyky-a-takozh-ukhvalyv-rishennia-pro-provedennia-auktsionu-na-budivnytstvo-novykh-potuzhnostey-vde-do-110-mvt-ta-konkursu-na-budivn/> (дата звернення: 17.09.2024).
24. Doczekal Ch. Heat Storages. Smart strategies for the transition in coal intensive regions. 2019. Project No: 836819. URL: https://tracer-h2020.eu/wp-content/uploads/2019/10/TRACER_D2.1-Heat-Storages.pdf (Last accessed: 16.03.2023).
25. Браверман В.Я., Жук Г.В., Ільєнко Б.К. Технології криогенного накопичення електроенергії від відновлюваних джерел. *Енерготехнології та ресурсозбереження*. 2022. № 4. С. 45–50. <https://doi.org/10.33070/etars.4.2022.04>
26. Крутоголова І.О., Браверман В.Я., Ільєнко Б.К. Розподілені мікромережі з використанням криогенних систем зберігання електроенергії, виробленої відновлюваними джерелами, як важливий еколого-економічний чинник. *Енерготехнології та ресурсозбереження*. 2023. № 3. С. 35–42. <https://doi.org/10.33070/etars.3.2023.03>
27. Cold Storage of Wind Energy. Night Wind. URL: https://cordis.europa.eu/docs/results/20/20045/121790181-6_en.pdf (Last accessed: 17.08.2023).

References

1. Babak, V.P., & Kulyk, M.M. (2023). Possibilities and Perspectives of the Consumers-Regulators Application in Systems of Frequency and Power Automatic Regulation. *Technical Electrodynamics*, 4, 72–80. <https://doi.org/10.15407/techned2023.04.072>
2. Kulyk, M.M. (2015). Technical and Economic Aspects of Using Consumers-Regulators in Systems of Automatic Frequency and Power Regulation. *The Problems of General Energy*, 1(40), 20–28 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.15407/pge2015.01.020>
3. Derii, V., Teslenko, O., Lenchevsky, E., Denisov, V., & Maistrenko, N. (2023). Prospects and energy-economic indicators of heat energy production through direct use of electricity from renewable sources in modern heat generators. *Systems, Decision and Control in Energy IV*, 454 (pp. 451–463), Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-22464-5_27
4. Zgurovets, O., & Kulyk, M. (2023). Application of energy storage for automatic load and frequency control. In O. Kyrylenko, S. Denysiuk, D. Derevianko, I. Blinov, I. Zaitsev, A. Zaporozhets (Eds.), *Power Systems Research and*

Operation. Studies in Systems, Decision and Control, 220 (pp. 75–85). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-17554-1_4

5. Hotra, O., Kulyk, M., Babak, V., Kovtun, S., Zgurovets, O., Mroczka, J., & Kisała, P. (2024). Organisation of the Structure and Functioning of Self-Sufficient Distributed Power Generation. *Energies*, 17(1). <https://doi.org/10.3390/en17010027>
6. Zaporozhets, A., Kostenko, G., Zgurovets, O., & Deriy, V. (2024). Analysis of Global Trends in the Development of Energy Storage Systems and Prospects for Their Implementation in Ukraine. In O. Kyrylenko, S. Denysiuk, R. Strzelecki, I. Blinov, I. Zaitsev, A. Zaporozhets (Eds.), *Power Systems Research and Operation. Studies in Systems, Decision and Control*, 512 (pp. 69–87). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-44772-3_4
7. Babak, V.P., & Kulyk, M.M. (2023). Increasing the Efficiency and Security of Integrated Power System Operation Through Heat Supply Electrification in Ukraine. *Science and Innovation*, 19(5), 100–116. <https://doi.org/10.15407/scine19.05.100>
8. Bielokha, H., Chupryna, L., Denisyuk, S., Eutukhova T., & Novoseltsev, O. (2023). Hybrid Energy Systems and the Logic of Their Service-Dominant Implementation: Screening the Pathway to Improve Results. *Energy Engineering*, 120(6), 1307–1323. <https://doi.org/10.32604/ee.2023.02586>
9. Supply and use of energy. *State Statistics Service*. Retrieved October 23, 2024, from <https://ukrstat.gov.ua/> [in Ukrainian].
10. Integration of RES into the energy system of Ukraine. *Ukrenergo*. Retrieved June 03, 2020, from <https://ua.energy/zagalni-novyny/u-2020-rotsi-vstanovlena-potuzhnist-ves-ta-ses-zrosla-na-41-a-yihnya-chastka-u-strukturi-vyrobnystva-elektroenergiyi-vdvichi/> [in Ukrainian].
11. Heat supply. *Wikipedia*. Retrieved April 18, 2024, from <https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A2%D0%B5%D0%BF%D0%BB%D0%BE%D0%BF%D0%BE%D1%81%D1%82%D0%B0%D1%87%D0%B0%D0%BD%D0%BD%D1%8F> [in Ukrainian].
12. Kuzin, M. (2022, October 18). Operational assessment of destruction and economic losses in the district heating sector caused by Russian aggression in Ukraine. *Vox Ukraine*. Retrieved April 18, 2024, from <https://voxukraine.org/operativna-otsinka-rujnuvan-ta-ekonomichnyh-vtrat-u-sektori-tsentralizovanogo-teplopostachannya-sprychynenyh-rosijskoyu-agresiyeyu-v-ukrayini> [in Ukrainian].
13. About the main performance indicators of heating boiler houses and heat networks in Ukraine. State Statistics Service of Ukraine. *Statistical bulletins for 2005–2014*. Retrieved October 24, 2024, from https://ukrstat.gov.ua/druk/publicat/Arhiv_u/05/Arch_tep_bl.htm [in Ukrainian].
14. Derii, V.O. (2017). Possibilities of the introduction of electric heat-generators in district heating systems of Ukraine. *The Problems of General Energy*, 3(50), 50–59 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.15407/pge2017.03.050>
15. National Energy and Climate Plan of Ukraine 2025–2030 [draft]. Retrieved October 23, 2024, from <https://www.me.gov.ua/Documents/Download?id=e79ecda3-f092-4d36-b600-21083ee61fa8> [in Ukrainian].
16. Decentralized heating in Ukraine: potential and ways of implementation. (2017, March). The report was prepared as part of the "Secretariat and Expert Hub on Energy Efficiency" project, which is implemented by the United Nations Development Program in Ukraine with the support of the Government of the Slovak Republic and the Ministry of Regional Development, Construction and Housing in Ukraine. Retrieved October 17, 2022, from <https://www.minregion.gov.ua/wp-content/uploads/2017/03/Detsentralizovane-opalennya.-Potentsial-ta-shlyahi-vprovadzhennya.pdf> [in Ukrainian].
17. Information on the release of thermal energy by energy companies of Ukraine. *Energy Business* for 2014–2018 [in Ukrainian].
18. State Statistics Service. *Energy statistics for 2018*. Retrieved February 14, 2024, from https://ukrstat.gov.ua/operativ/infografika/2020/energ/energ_2018.pdf [in Ukrainian].
19. Development of renewable energy sources in Ukraine. (March 2017). The report was prepared as part of the "Secretariat and Expert Hub on Energy Efficiency" project, which is implemented by the United Nations Development Program in Ukraine with the support of the Government of the Slovak Republic and the Ministry of Regional Development, Construction and Housing in Ukraine. Retrieved February 14, 2021, from <https://www.minregion.gov.ua/wp-content/uploads/2017/03/Rozvitok-VDE-v-Ukrai--ni.pdf> [in Ukrainian].
20. National Energy and Climate Plan of Ukraine 2025–2030 (draft). *Website of the Ministry of Economy of Ukraine*. Retrieved April 28, 2024, from <https://www.me.gov.ua/Documents/Download?id=e79ecda3-f092-4d36-b600-21083ee61fa8> [in Ukrainian].
21. About the National Renewable Energy Action Plan for the period up to 2030. *Website of the State Energy Efficiency Agency*. Retrieved April 28, 2024, from <https://sae.gov.ua/uk/content/elektronni-consultatsii> [in Ukrainian].
22. Cabinet of Ministers of Ukraine. On the approval of the National Renewable Energy Action Plan for the period up to 2030 and the plan of measures for its implementation dated August 13, 2024. Order No. 761. Kyiv. Retrieved September 17, 2024, from <https://www.kmu.gov.ua/npas/pro-zatverdzhennia-natsionalnoho-planu-dii-z-vidnovliuvanoi-enerhetyky-na-p-a761> [in Ukrainian].
23. National renewable energy action plan for the period up to 2030. Retrieved September 17, 2024, from <https://chamber.ua/ua/news/uriad-ukrainy-zatverdyy-natsionalnyy-plan-diy-z-vidnovliuvanoi-enerhetyky-a-takozh-ukhvalyv-rishennia-pro-provedennia-auktsionu-na-budivnytstvo-novykh-potuzhnostey-vde-do-110-mvt-ta-konkursu-na-budivn/> [in Ukrainian].

24. Doczekal, Ch. (2019, September). Heat Storages. Smart strategies for the transition in coal intensive regions. Project No: 836819. Retrieved March 16, 2023, from https://tracer-h2020.eu/wp-content/uploads/2019/10/TRACER_D2.1-Heat-Storages.pdf
25. Braverman, V.Ya., Zhuk, H.V., & Iliencko, B.K. (2022). Technologies of cryogenic storage of electricity from renewable sources. *Energy Technologies & Resource Saving*, 4, 45–50 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.33070/etars.4.2022.04>
26. Krutogolova, I.O., Braverman, V.Ya., & Iliencko, B.K. (2023). Distributed microgrids using cryogenic storage systems of electricity produced by renewable sources as an important ecological and economic factor. *Energy Technologies & Resource Saving*, 3, 35–42 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.33070/etars.3.2023.03>
27. Cold Storage of Wind Energy Night Wind. Retrieved August 17, 2023, from https://cordis.europa.eu/docs/results/20/20045/121790181-6_en.pdf

MARGINAL POSSIBILITIES OF CENTRALIZED HEAT SUPPLY REGARDING THE USE OF ELECTRICITY FROM RENEWABLE SOURCES

Volodymyr Derii, PhD (Engin.), Senior Research Scientist, <https://orcid.org/0000-0002-5689-4897>
 General Energy Institute of NAS of Ukraine, 172, Antonovycha St., Kyiv, 03150, Ukraine
 e-mail: derii.volodymyr@gmail.com

Abstract. *The article presents the results of a study on the use of electricity from solar and wind power plants by the centralized heat supply of Ukraine for its direct conversion into heat using electric heat generators (electric boilers and heat pumps). The marginal possibilities of the centralized heat supply of Ukraine regarding the use of this heat energy, which is the purpose of this work, have been assessed. To carry out the analysis, a calculation model was created, limitations were set, and methodical approaches were developed to determine the necessary initial data. Research was conducted for heating and non-heating periods. In the non-heating period, four different options for using electricity from solar and wind power plants for its conversion into heat were simulated. The results of the calculations showed that as of 2021, during the heating period, the demand for thermal energy significantly exceeds the possibilities of its production by electric heat generators that consume electricity from solar and wind power plants. The limit value is the total capacity of solar and wind power plants of 18.514 MW. In the non-heating period, all the electricity produced by solar and wind power plants cannot be fully consumed by electric heat generators of centralized heat supply due to the fact that there will be a surplus of heat energy of 1736.4 thousand MWh. 21.7 million m³ of water will be needed to accumulate this amount of thermal energy with seasonal thermal accumulators. With an average volume of a seasonal heat accumulator of 60,000 m³, you will need about 360 of them. In the conditions of the dense construction of urban settlements, it is unlikely to build such a number of seasonal thermal accumulators. The most likely option is the partial use of electricity from solar and wind power plants by electric heat generators of centralized heating, electrolyzers for hydrogen production and product cooling systems. At the same time, heating boilers on fossil fuel will work together with electric heat generators, which will ensure the reliability of heat supply.*

Keywords: solar power plants, wind power plants, centralized heat supply, electrothermal generators, electricity.

Надійшла до редколегії: 05.11.2024