

КОМПЛЕКСНЕ ВИКОРИСТАННЯ ПІДЗЕМНОГО АКУМУЛЮВАННЯ ТЕПЛОТИ, ТЕПЛОНАСОСНОЇ СИСТЕМИ ТА СОНЯЧНИХ КОЛЕКТОРІВ

Олексій Зур'ян

кандидат технічних наук, заступник директора з наукової роботи

Інститут відновлюваної енергетики Національної академії наук України, вул. Гната Хоткевича, 20А, Київ, Україна, 02094, alexey_zuryan@ukr.net

ORCID: 0000-0002-2391-1611

Одним із перспективних напрямів створення децентралізованих систем опалення невеликих міст, поселень та окремих об'єктів різного призначення може бути застосування комплексних енергосистем на основі низькопотенційної геотермальної та енергії сонячного випромінювання. Метою роботи є на основі попередньо отриманих експериментальних даних та аналітичних розрахунків ефективності роботи геліосистеми, геотермальної теплонасосної системи й буферного накопичувача низькопотенційної теплової енергії в конкретних умовах експлуатації на полігоні Інституту відновлюваної енергетики НАН України обґрунтувати технічну й економічну перспективність поєднання цих трьох систем в один енергетичний комплекс. Доведено, що актуальним завданням під час проектування комплексних локальних систем (кластеру) енергозабезпечення з використанням відновлюваних джерел енергії є створення ефективної системи управління. В умовах сьогодення такі системи мають будуватися на основі відповідної елементної бази, сучасної мови програмування, чутливих вимірювальних приладів, ефективних алгоритмів оцінювання та прийняття рішень. У роботі подано діючий макет розробленої та сконструйованої в Інституті відновлюваної енергетики НАН України експериментальної гідротермальної теплонасосної системи, до складу якої входить система забору низькопотенційної теплової енергії, тепловий насос, геліосистема та акумулятор теплової енергії. Оригінальністю роботи є те, що з метою підвищення ефективності роботи кластеру розроблена система управління, яка складається з основного модуля й модулів управління окремими підсистемами, функціонально поєднаних між собою. Виконано опис кожного функціонального блоку системи. Розроблена математична модель спільної роботи в одній системі трьох окремих конструктивно та функціонально незалежних модулів, що використовують енергію сонячного випромінювання, низькопотенційну геотермальну енергію й теплоту довкілля. Практична цінність полягає в підвищенні ефективності та надійності запропонованої системи теплозабезпечення, її надійності й стійкості. Зроблено висновки щодо необхідності проведення експериментальних та аналітичних досліджень ефективності застосування запропонованої системи управління енергетичним кластером. Робота проведена в рамках виконання науково-дослідної роботи «Розроблення енергетичних кластерів для забезпечення об'єктів багатопільового призначення електричною та тепловою енергією з використанням технологій відновлюваної та водневої енергетики (шифр: «Енерго-гарант»)).

Ключові слова: тепловий насос, теплонасосна система, геліосистема, система управління, модуль управління.

Актуальність роботи. Відновлювана енергетика є важливим інструментом для досягнення цілей сталого розвитку, включаючи збереження довкілля, забезпечення сталого виробництва та зменшення впливу енергетичного сектору на клімат. Відновлювані джерела енергії (ВДЕ) є нескінченними джерелами, що не вичерпуються з часом. Це забезпечує стабільне джерело енергії на майбутнє.

Разом із тим основний недолік відновлюваної енергії – її непостійність. Виробництво як теплової, так й електричної енергії енергетичними установками, які як джерело енергії використовують ВДЕ, залежить як від місця розміщення й умов експлуатації, так і погодно-кліматичних умов, зміна яких має випадковий характер. Тому в локальних енергосистемах із ВДЕ є ризики енергопостачання споживачів, пов'язані з мінливістю енергоносія.

Наслідки від цих ризиків полягають у високій імовірності порушення енергопостачання споживачів. Таким чином, важливим питанням стає розробка методики проектування енергетичних систем, які працюють за рахунок ВДЕ з урахуванням випадкового характеру факторів, що впливають на стабільність отримання енергії.

Серед відновлювальних джерел енергії теплота земних надр характеризується стабільністю параметрів, які не залежать від сезонних і добових коливань температури. Різновиди геотермальних джерел енергії, акумульовані гірськими породами, підземними термальними водами в усіх агрегатних станах, верхніми шарами Землі, які розташовано нижче нейтрального шару та мають температуру до 36 °С. Одним із високоефективних пристроїв перетворення низькопотенційної відновлюваної енергії є теплові насоси.

Разом із тим ефективність роботи теплонасосної системи суттєво залежить від температури на вході до випарника теплового насосу. Вирішення цієї проблеми може полягати у створенні комплексної енергосистеми на основі геотермальної та сонячної теплової енергії з використанням технологій підземного акумулювання теплової енергії в ґрунті або водоносному горизонті й теплових насосів для теплопостачання об'єктів різного призначення й потужності.

Науково-дослідні та дослідно-конструкторські роботи з підвищення ефективності геотермальних теплових насосів проводять як в Україні, так і світі вже тривалий час. Перспективи застосування теплових насосів досліджені в роботах [1; 2; 3]. Аналіз ефективності використання теплового потенціалу доквілля та верхніх шарів Землі зроблено в працях [4; 5]. У роботах [6; 7; 8] проведено оцінювання ефективності теплових насосів різних типів. Автори [9; 10] виконали порівняльний енергетичний аналіз теплових насосів. Дослідження щодо встановлення теплового балансу в ґрунті під час експлуатації ГеоТНС описано в працях [11; 12]. Проводяться активні науково-дослідницькі роботи з вивчення фізичних особливостей та енергетичної ефективності акумулювання тепла й холоду шляхом використання води підземних горизонтів [14; 15]. Ефективність комбінованого використання енергії вітру, сонця й теплоти землі дослідили автори в роботах [16; 17]. Методичні засади для оптимальної побудови енергетичних комплексів з використанням відновлюваних джерел енергії розглядаються в працях [18].

У працях [19; 20] автори розробили математичну модель роботи системи з кількома відновлюваними джерелами енергії. Наукове обґрунтування залучення розумних мереж (Smart Grid) у систему управління комплексними енергосистемами на основі ВДЕ викладено в праці [21].

Разом із тим теоретичні та практичні методи побудови енергетичних комплексів із використанням відновлюваних джерел енергії в Україні до сьогодні остаточно не відпрацьовано. Взаємодія сонячного колектора, буферного накопичувача низькопотенційної теплової енергії, встановленого в контурі випарника теплового насосу та геотермальної теплонасосної системи, раніше не розглядалася. Результати досліджень підтверджують перспективність напряму комбінованого використання підземного акумулювання теплоти й сонячних колекторів для потреб

опалення, кондиціонування, гарячого водопостачання та забезпечення технологічних потреб споживачів.

Матеріал і результати досліджень. Комбіноване використання підземного акумулювання теплоти (наприклад, у водоносному горизонті) та сонячних колекторів може мати декілька переваг:

– Підвищена ефективність. Спільне застосування трьох видів відновлюваних джерел енергії (сонячної, геотермальної та теплоти доквілля) в одній енергетичній системі й використання спеціально розроблених програмних продуктів на засадах Smart Grid дають змогу застосовувати в конкретних умовах експлуатації саме те поєднання цих систем, що є найбільш ефективним.

– Постійна доступність. Відновлювана енергія є нестабільним джерелом, оскільки її доступність залежить від певних кліматичних умов та умов розташування. Акумуляція теплоти в підземному резервуарі дає змогу забезпечити постійний доступ до теплоти протягом усього року.

– Збереження енергії на тривалий термін. Підземний резервуар може зберігати тепло на тривалий термін, даючи змогу використовувати його навіть за відсутності сонячної інсоляції вночі або в зимовий період.

– Зменшення навантаження на мережу. Комбінована система може зменшити навантаження на електроенергетичну мережу, оскільки тепло може бути використано безпосередньо з акумулятора, коли воно необхідне.

Загалом комбіноване використання сонячних колекторів і підземного акумулювання теплоти може покращити надійність та ефективність системи теплопостачання, забезпечуючи постійний доступ до теплової енергії.

Мета дослідження – розробити прикладну методологію комплексного застосування сонячної та геотермальної енергії, на їх основі запропонувати енергоефективні технічні рішення щодо можливостей комбінованого використання природних відновлюваних джерел теплової енергії.

Відповідно до поставленої мети дослідження, на першому етапі мають бути вирішені такі завдання:

1. Обґрунтувати структуру енергетичного кластера й запропонувати технічне рішення, що поєднують в одній енергетичній системі сонячний колектор, тепловий насос і ґрунтовий акумулятор теплової енергії.

2. Розробити алгоритм спільної роботи сонячного колектора, підземного акумулятора теплоти й теплового насосу.

3. Запропонувати перспективні напрями необхідних подальших експериментальних досліджень щодо визначення ефективності запропонованих технічних рішень і їх доопрацювання.

У статті використано такі методи: аналіз, синтез, дедукцію, метод екстраполяції, порівняльний та індуктивний методи.

Об'єктом дослідження є процеси періодичного перенесення теплової енергії з послідовним нагріванням та охолодженням.

Предметом дослідження є параметри процесів, що відбуваються в комплексній енергетичній системі, природний ґрунтовий акумулятор теплоти – сонячний колектор – тепловий насос.

У методиці побудови енергетичних комплексів з використанням відновлюваних джерел енергії зазвичай головними критеріями вибору ВДЕ є загальна потужність системи, вартість енергії, яка виробляється, розміри й вартість застосовуваних енергоустановок, частка заміщення вуглеводневого палива тощо.

Ми проаналізували наявні методики побудови цих систем, насамперед ті, які стосувалися як методики вибору оптимального поєднання відновлюваних джерел енергії, так й управління гібридними енергетичними системами з відновлюваними джерелами енергії [22].

Система зі змінною структурою та відновлюваними джерелами енергії для забезпечення визначеної температури в процесі поставки теплоносія споживачам, як кортеж S , має вигляд:

$$S = \{M_{ДТЕ}, M_{ТС}, M_C\}, \quad (1)$$

де $M_{ДТЕ}$ – безліч джерел теплової енергії,

$M_{ТС}$ – безліч технічних засобів,

M_C – безліч структур.

Для об'єкта енергетики, що представлений у такому вигляді, також потрібна система управління, яка дає змогу обрати найліпший варіант із можливих запропонованих залежно від потреб споживача, параметрів теплоносіїв системи й умов навколишнього природного середовища. Тобто дає змогу раціонально забезпечити з представлених множин вибір джерел енергії, технічних пристроїв і структури об'єкта.

Для оцінювання ефективності комплексної енергетичної системи, яка використовує альтернативні джерела енергії й має змінювану структуру, запропоновано критерій k , який є відношенням сумарних витрат енергії (електроенергії та енергії органічного палива) для роботи системи до поточної потреби споживача в енергії для забезпечення заданої температури в приміщеннях:

$$k = \min \left(\sum_{i=1}^n E_i \Delta t_i / \left(\int_0^{\tau} Q(t) dt \right) \right), \quad (2)$$

де E_i – первинні енергетичні ресурси, що використовуються системою для забезпечення заданої температури, Дж; $Q(t)$ – поточна нормована потреба в енергії для забезпечення заданої температури, Дж; t – кінцевий часовий інтервал, на якому проходить обмін і споживання енергоресурсів, с; n – кількість різних видів енергетичних ресурсів системи.

Під час розрахунку критерію різні варіанти структур приводяться до однакового корисного ефекту за запропонованою методикою [22].

Інформаційні моделі підсистем відображають статичку системи й інформацію про елементи системи, їх властивості й відношення між ними.

Моделі станів об'єктів підсистем відображають їх поведінку в часі, як правило, виражаються через стани «увімкнено – вимкнено – несправність» або «відкриття – закриття – несправність» і відповідні переходи. Життєвий цикл контролера має вісім положень, які відображають перевірку працездатності системи, обробку прийнятих сигналів, аналіз змін, вибір конфігурації системи, задавання параметрів регуляторів.

Технологічні алгоритми дають змогу змінити структуру системи залежно від потреб споживача й умов навколишнього природного середовища на основі критерію оцінювання ефективності системи.

Експериментальна установка ІВЕ НАН України є теплообмінним пристроєм, який складається з двох свердловин, поєднаних трубопроводами для циркуляції підземних вод між водоносним горизонтом, тепловим насосом, розташованим в будівлі Інституту, і сонячного колектора. Контур конденсатора теплового насоса поєднано з фанкойлами, розташованими в приміщеннях будівлі. При цьому забезпечена конструктивна можливість підключення до контуру випарника теплового насоса буферного накопичувача теплової енергії, об'єм якого може змінюватися залежно від завдань дослідження та потужності підключених приладів [23].

Як навантаження для теплового насоса використовувалися фанкойли.

Для підвищення ефективної роботи всіх систем автоматизації прийняття рішення щодо їх підключення в оптимальній конфігурації залежно від усіх наявних теплотехнічних параметрів поставлено завдання щодо розробки система

управління енергетичного кластеру на тепловому насосі. Для забезпечення її роботи встановлено додаткові датчики температури та потоку теплоносія, автоматичної запірної арматури й локальних і мережевих модулів управління як окремими підсистемами, так і системою в цілому. Разом геотермальні теплообмінники, буферний накопичувач, геліосистема, фанкойли, акумулятори теплової енергії та елементи системи управління становлять елементи системи, що досліджуються (рис. 1).

Згідно з методикою оцінювання ефективності комплексної енергетичної системи (2), визначити пріоритети підключення до загального енергетичного кластеру кожної із систем відповідно до корисного ефекту.

Пріоритет 1 – буферний накопичувач теплової енергії – тепловий насос (джерело енергії – відновлювана теплота доквілля).

Пріоритет 2 – геліосистема (джерело енергії – відновлювана енергія сонця).

Пріоритет 3 – геотермальна теплонасосна система (відновлювана низькопотенційна енергія води водоносного горизонту).

За критерій переходу від однієї системи до іншої, відповідно до пріоритету, вибрано діапазон оптимальних температур теплоносія на вході до випарника теплового насосу від $9\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $6\text{ }^{\circ}\text{C}$, який забезпечує оптимальний коефіцієнт перетворення теплонасосної системи для низькопотенційних джерел енергії [14].

На рис. 2 наведено розроблений алгоритм спільної роботи сонячного колектора, підземного акумулятора теплоти й теплового насоса.

Відповідно до алгоритму рис. 2, комплексна система теплозабезпечення працює так: теплоносії (вода) з початковою температурою в точці T2 поступає з буферного накопичувача теплової енергії до випарника теплового насоса, де віддає частку свого потенціалу та з меншою температурою повертається знову до буферного накопичувача теплової енергії. За рахунок того що буфер-

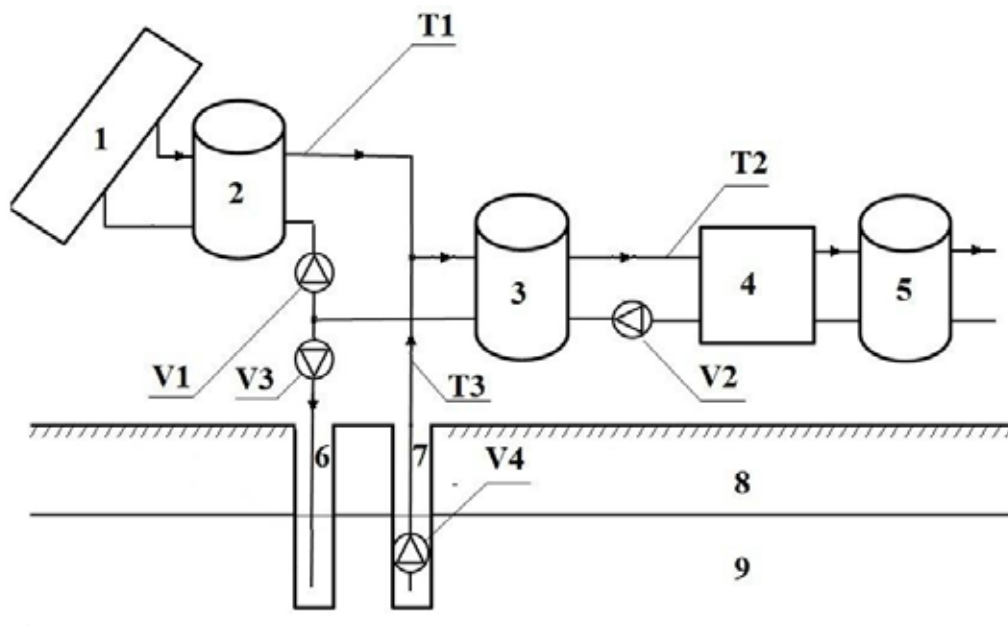


Рис. 1. Експериментальна теплоенергетична установка: 1 – сонячний колектор; 2 – акумулятор теплової енергії сонячного колектора; 3 – буферний накопичувач теплової енергії; 4 – тепловий насос; 5 – тепловий акумулятор системи теплозабезпечення будівлі; 6 – поглинальна свердловина; 7 – видобувна свердловина; 8 – водотривкий шар ґрунту; 9 – водоносний горизонт; T1 – температура на виході з акумулятора теплової енергії сонячного колектора; T2 – температура на виході з буферного накопичувача теплової енергії; T3 – температура на виході з видобувної свердловини; V1 – циркуляційний насос контуру: акумулятор теплової енергії сонячного колектора – буферний накопичувач теплової енергії; V2 – циркуляційний насос контуру: буферний накопичувач теплової енергії – тепловий насос; V3 – насос подачі теплоносія (води) з буферний накопичувач теплової енергії до поглинальної свердловини; V4 – насос подачі теплоносія (води) з видобувної свердловини до накопичувача теплової енергії

ний накопичувач теплової енергії розташований у заглибленому в ґрунт підвальному приміщенні й конструктивно виконаний як нетеплоізолювана ємкість, у ньому відбувається регенерація теплоти, після чого теплоносій знову подається на випарник теплового насосу.

Більш детально процеси теплообміну й ефективність використання буферного теплообмінника геотермальної теплонасосної системи описано в роботі [24].

Коли температура на виході з буферного накопичувача теплової енергії (на вході до випарника теплового насосу) зменшується до мінімально критичної (у нашому випадку $6\text{ }^{\circ}\text{C}$), автоматизована система додатково поєднує буферний накопичувач теплової енергії до контуру акумулятора теплової енергії сонячного колектора. Процес підвищення теплового потенціалу відбувається до тих пір, поки температура на вході до випарника теплового насоса не підніметься до максимально необхідної (у нашому випадку $9\text{ }^{\circ}\text{C}$). Після цього система переходить у попередній

режим. Цей процес підключення геліосистеми до теплового насоса відбувається до тих пір, поки в теплому акумуляторі геліосистеми буде достатньо теплової енергії для його підтримання. На рис. 3 ці періоди позначені як Δt_3 та Δt_5 .

Коли температура на виході з буферного накопичувача теплової енергії (на вході до випарника теплового насоса), зменшується до мінімально критичної (у нашому випадку $6\text{ }^{\circ}\text{C}$) і при цьому температура на виході з акумулятора теплової енергії геліосистеми в точці T1 менша за критичну (у нашому випадку $6\text{ }^{\circ}\text{C}$), автоматизована система додатково поєднує буферний накопичувач теплової енергії до контуру геотермальної системи. Включаються насоси V3 та V3. Процес підвищення теплового потенціалу відбувається до тих пір, поки температура на вході до випарника теплового насоса не підвищиться до максимально необхідної (у нашому випадку $9\text{ }^{\circ}\text{C}$). Після цього система переходить у попередній режим. Цей процес підключення геотермальної системи до буферного накопичувача теплової

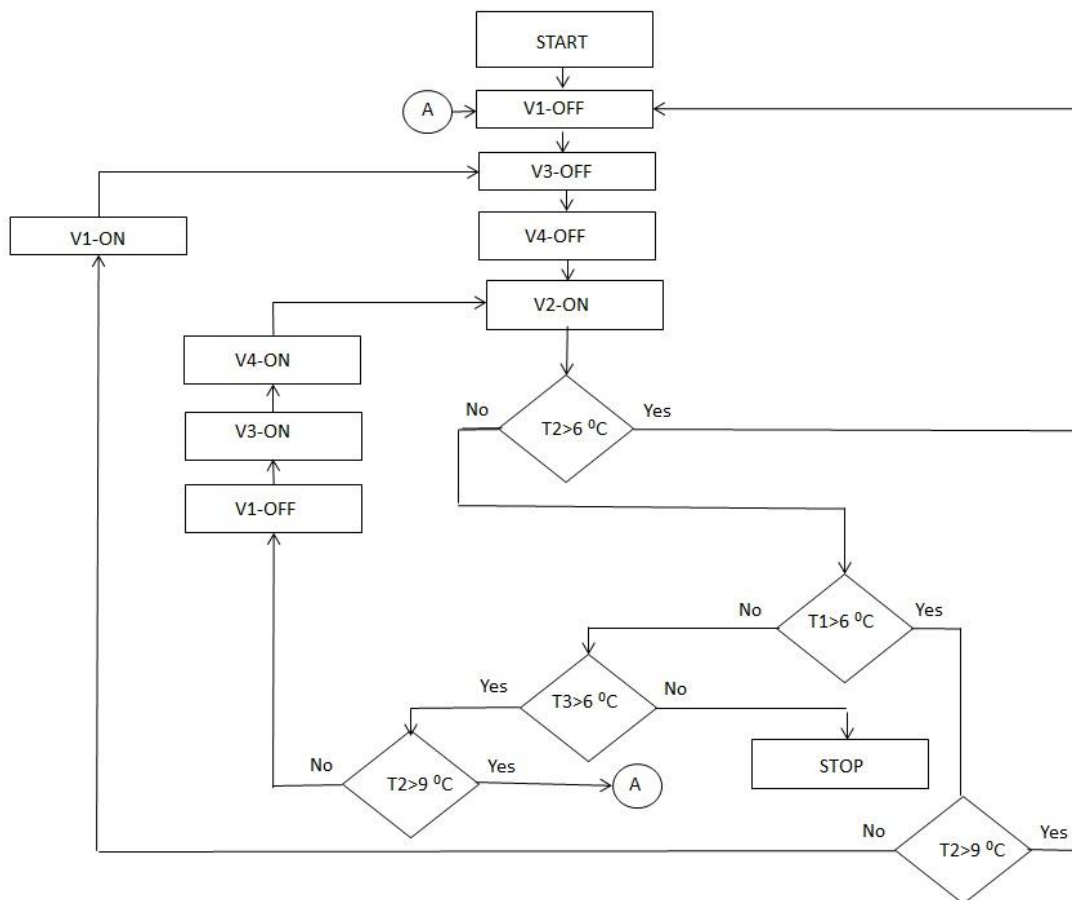


Рис. 2. Алгоритм спільної роботи сонячного колектора, підземного акумулятора теплоти й теплового насосу

енергії відбувається до тих пір, поки в буферному накопичувачі теплової енергії буде достатньо теплоти для самостійної роботи в контурі випарника теплового насосу. На рис. 3 ці періоди позначені як Δt_6 та Δt_8 .

З результатів моделювання можна побачити, що буферний накопичувач теплової енергії, установлений у контурі випарника теплового насоса, є ефективним пристроєм, що забезпечує стабільність та ефективність роботи системи в поєднанні з додатковими системами, що працюють за рахунок використання різних відновлюваних джерел енергії та її накопичення в єдиний енергетичний кластер. Відомо, що збільшення навантаження на опалення призводить до збільшення використання низько потенційної теплової енергії та витрат на роботу насосного обладнання. Ефективність цієї системи досягається за рахунок зменшення витрат на роботу насосного обладнання за рахунок перерозподілу навантаження під час роботи комплексної енергосистеми від більш енергетично ошадливого обладнання

до менш енергетично ошадливого. Мають перспективу подальші дослідження щодо складання алгоритмів роботи комплексних енергосистем, за яких керівне рішення щодо режиму роботи системи можливо приймати в результаті вирішення багатокритеріальної оптимізації, використовуючи, наприклад, алгоритм багатокритеріальної оптимізації за наявності бінарних відношень вибору [25].

Висновки. На основі попередньо отриманих експериментальних даних та аналітичних розрахунків ефективності роботи геліосистеми, геотермальної теплонасосної системи та буферного накопичувача низькопотенційної теплової енергії в конкретних умовах експлуатації обґрунтовано технічну й економічну перспективність комплексного використання підземного акумулювання теплоти, теплового насоса та сонячних колекторів в одному енергетичному комплексі.

Теоретично обґрунтовано, що малоємну систему акумулювання теплової енергії, до якої входить буферний накопичувач теплоносія, тепловий

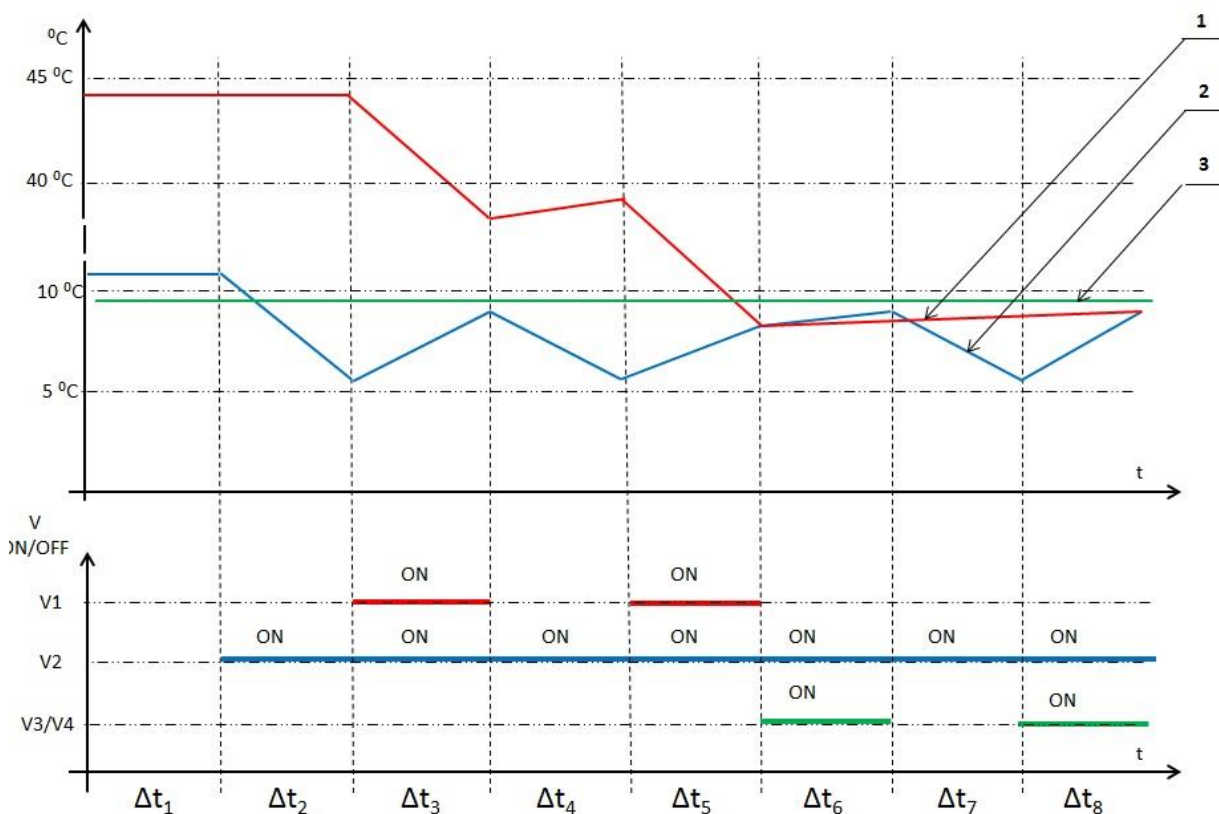


Рис. 3. Графік розподілу температур і режимів роботи складників енергетичного кластеру:

1 – температура теплоносія на виході з акумулятора теплової енергії сонячного колектора; 2 – температура теплоносія на виході з буферного накопичувача теплової енергії; 3 – температура води (теплоносія) на виході з видобувної свердловини; V1, V2, V3/V4 – режим роботи насосів (ON/OFF)

насос і фанкойли, можна ефективно застосувати як самостійний елемент енергетичного кластеру для забезпечення об'єктів багатоцільового призначення теплової енергії.

Доведено, що актуальним завданням під час проектування комплексних локальних систем (кластеру) енергозабезпечення з використанням відновлюваних джерел енергії є створення ефективної системи управління.

Мають перспективу подальші дослідження щодо можливості прийняття остаточного керівного рішення стосовно режиму роботи системи в результаті вирішення завдання багатокритеріальної оптимізації.

ЛІТЕРАТУРА

1. Безродний М.К., Пуховий І.І., Кутра Д.С. Теплові насоси та їх використання : навчальний посібник. Київ : КПІ, 2013. 312 с.
2. Долінський А.А., Драганов Б.Х. Теплові насоси у системі теплопостачання будівель. *Промислова теплотехніка*. 2008. № 6. С. 71–83.
3. Кудря С.О. Відновлювані джерела енергії : монографія. Київ : ІБЕ НАН України, 2020. 354 с.
4. Geothermal (ground-source) heat pumps a world overview / J. Lund, B. Sanner, L. Rybach, R. Curtis, G. Hellstrom. *GHC bulletin*. 2004. № 9. P. 1–10.
5. Оцінка ефективності використання теплового потенціалу доквілля та верхніх шарів Землі України / Ю.П. Морозов, Д.М. Чалаєв, Н.В. Ніколаєвська, М.П. Добровольський. *Відновлювана енергетика*. 2019. № 4 (63). С. 80–88. [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2020.4\(63\).80-88](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2020.4(63).80-88).
6. The geothermal potential of urban heat islands / Zhu Ke, Blum Philipp, Ferguson Grant, Balke Klaus-Dieter, Bayer Peter. *Environ. Res. Lett.* 2010. № 5. P. 1–6. <http://dx.doi.org/10.1088/1748-9326/6/1/019501>.
7. Енергетична ефективність використання перших від поверхні водоносних горизонтів для тепло- і хладопостачання / Ю.П. Морозов, А.А. Баріло, Д.М. Чалаєв, М.П. Добровольський. *Відновлювана енергетика*. 2019. № 2. С. 7078. [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2019.2\(57\).70-78](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2019.2(57).70-78).
8. Zurian O. V. Comparison of efficiency of geothermal and hydrothermal energy systems. *XIX International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM. Renewable Energy Sources and Clean Tech*. Varna-Bulgaria, 2019. С. 83-90. <https://doi.org/10.5593/sgem2019/4.1/S17.011>.
9. Малкін Е.С., Кулінко Є.О. Перспективи та аспекти застосування систем теплохолодопостачання, які використовують приповерхневі шари води в якості теплового акумулятора. *Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання*. 2014. № 17. С. 63–69.
10. Denisov O. I. Comparative energy analysis of heat pumps and traditional heating systems. *Tehnicheskaya teplofizika i promyshlennaya teploenergetika Ukraine*. 2010. № 2. P. 22–34.
11. Greenhouse gas emission savings of ground source heat pump systems in Europe / P. Bayer, D. Sanner, S. Bolay, L. Rybach, P. Blum. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2012. № 16. P. 1256–1267. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.09.027>.
12. Зур'ян О.В., Олійніченко В.Г. Гідротермальна система отримання теплової енергії, фізичні процеси, ефективність. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2021. № 4. С. 40–46. <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2021-157-4-40-46>.
13. Zurian O. Barilo A. Impact of the natural temperature regime of the upper layers of Earth on efficiency of a hydrothermal heat pump system. *Journal of Geology, Geography and Geoecology*. 2022. Vol. 31. № 3. С. 575–584. <https://doi.org/10.15421/112254>.
14. Зур'ян О.В. Експериментальні дослідження теплового режиму гідротермальної теплонасосної системи. *Відновлювана енергетика*. 2021. № 4 (67). С. 77–89. [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2021.4\(67\).77-89](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2021.4(67).77-89).
15. Експериментальне дослідження добового акумуляування холоду шляхом використання води підземних горизонтів м. Києва / Ю.П. Морозов, Д.М. Чалаєв, В.Г. Олійніченко, В.В. Величко. *Відновлювана енергетика*. 2019. № 3. С. 67–77. [https://doi.org/10.36296/1819-058.2019.3\(58\).67-77](https://doi.org/10.36296/1819-058.2019.3(58).67-77).
16. Кудря С.О., Морозов Ю.П., Кузнєцов М.П. Дослідження ефективності комбінованого використання енергії вітру, сонця і теплоти землі для отримання водню при електролізі води. Водень в альтернативній енергетиці та новітніх технологіях. *Тези доповідей наукової звітної сесії НАН України*. Київ, 2013. С. 109–119.
17. Матях С.В., Суржик Т.В., Резцов В.Ф. Визначення ефективності впровадження систем сонячного гарячого водопостачання. *Відновлювана та воднева енергетика*. 2020 № 1 (60). С. 17–22. [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2020.1\(60\).17-22](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2020.1(60).17-22).
18. Зур'ян О.В. Комбіновані енергосистеми для ефективного отримання екологічно безпечної енергії. *Екологія та промисловість*. 2016. № 3. С. 96–100.
19. Прийняття оптимальних рішень при керуванні гібридними електричними мережами з відновлювальними джерелами енергії / С.О. Тимчук, В.В. Шендрік, С.О. Шендрік, О.В. Шуліма. *Електромеханічні і енергозберігаючі системи*. 2016. № 2 (34). С. 55–61.
20. A GIS-based decision support tool for renewable energy management and planning in semi-arid rural environments of northeast of Brazil / C. Tiba, A. Candeias, N. Fraidenraich et al. *Renewable Energy*. 2010. № 35 (12). P. 2921–2932.
21. A dynamic optimization model for smart micro-grid: integration of a mix of renewable resources for a green building / H. Dagdougui, R. Minciardi, A. Ouammi et al. *Proceedings of the 2010 International Congress on Environmental Modelling and Software*. Canada : Ottawa, 2010.

22. Максименко І.М. Автоматизація систем забезпечення заданої температури з альтернативними джерелами енергії : автореф. дис. ... канд. техн. наук : спец. 05.13.07 «Автоматизація технологічних процесів». Одеса, 2007. 20 с.

23. Зур'ян О.В., Матях С.В. Система управління енергетичним кластером на основі теплового насосу. *Відновлювана енергетика*. 2023. № 2. С. 92–99. [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2023.2\(73\)92-99](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2023.2(73)92-99).

24. Зур'ян О.В., Олійніченко В.Г. Ефективність роботи буферного накопичувача гідротермальної теплонасосної системи як акумулятора теплової енергії. *Відновлювана енергетика*. 2023. № 1 (72). С. 69–80. [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2023.1\(72\).69-80](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2023.1(72).69-80).

25. Irodov V.F., Chornomorets G.Y., Barsuk R.V. Multiobjective optimization in evolutionary search with a binary choice relation. *Cybernetics and Systems Analysis*. 2020. № 56 (3). С. 449–454.

COMPLEX USE OF UNDERGROUND HEAT STORAGE, HEAT PUMP SYSTEM AND SOLAR COLLECTORS

Oleksii Zurian

Candidate of Technical Sciences, Deputy Director for Research

Institute of Renewable Energy of the National Academy the Sciences of Ukraine, 20A Hnata Khotkevycha str., Kyiv, Ukraine, 02094, alexey_zuryan@ukr.net

ORCID: 0000-0002-2391-1611

One of the promising directions for the creation of decentralized heating systems of small cities, settlements and individual objects of various purposes can be the use of complex energy systems based on low-potential geothermal and solar energy. The purpose of the work is, on the basis of previously obtained experimental data and analytical calculations of the efficiency of the solar system, geothermal heat pump system and buffer storage of low-potential thermal energy in specific operating conditions at the training ground of the Institute of Renewable Energy of the National Academy of Sciences of Ukraine, to examine the technical and economic prospects of combining these three systems into one energy complex. It has been proven that the creation of an effective management system is an urgent task in the design of complex local energy supply systems (cluster) using renewable energy sources. In today's conditions, such systems should be built on the basis of an appropriate elemental base, a modern programming language, sensitive measuring devices, and effective evaluation and decision-making algorithms. The work presents the working layout of the experimental hydrothermal heat pump system developed and constructed at the Institute of Renewable Energy of the National Academy of Sciences of Ukraine, which includes: a low-potential thermal energy intake system, a heat pump, a solar system and thermal energy accumulators. The originality of this work is that in order to increase the efficiency of the cluster, a control system was developed, which consists of the main module and control modules of separate subsystems, functionally connected to each other. The description of each functional block of the system is completed. A mathematical model of joint work in one system of three separate structurally and functionally independent modules using solar radiation energy, low-potential geothermal energy and ambient heat has been developed. The practical value lies in increasing the efficiency and reliability of the proposed heat supply system, its survivability and stability. Conclusions have been made regarding the need to conduct experimental and analytical studies of the effectiveness of the proposed energy cluster management system. The work was carried out as part of the research project: "Development of energy clusters to provide multi-purpose facilities with electric and thermal energy using renewable and hydrogen energy technologies (code: "Energy-guarantor")".

Key words: heat pump, heat pump system, solar system, control system, control module.

REFERENCES

1. Bezrodnyi M.K., Pukhovyi I.I., Kutra D.S. (2013). *Теплові насоси та їхнє використання* [Heat pumps and their uses]. Kyiv: KPI [in Ukrainian].

2. Dolinsky A.A. & Draganov B.H. (2008). *Теплові насоси у системі теплостачання будівель* [Heat pumps in the heat supply system of buildings]. *Промислова теплотехніка – Industrial heat engineering*, 6, 71–83 [in Ukrainian].

3. Kudrya S.O. (2020) *Відновлювані джерела енергії* [Renewable energy sources]. Kyiv : IVE NAS of Ukraine [in Ukrainian].

4. Lund J., Sanner B., Rybach L. Curtis R., Hellstrom G. (2004) Geothermal (ground-source) heat pumps a world overview. *GHC bulletin*, 9, 1–10.

5. Morozov Yu.P., Chalaiev D.M., Nikolaievskaya N.V., Dobrovolskyi M.P. (2019) *Оцінка ефективності використання теплового потенціалу докільня та верхніх шарів Землі України*. [Evaluation of the effectiveness of the use of the thermal potential of the environment and the upper layers of the Earth of Ukraine]. *Відновлювана енергетика*, 4 (63), 80–88 [in Ukrainian]. [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2020.4\(63\).80-88](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2020.4(63).80-88)

6. Zhu Ke, Blum Philipp, Ferguson Grant, Balke Klaus-Dieter, Bayer Peter. (2010) The geothermal potential of urban heat islands. *Environ. Res. Lett*, 5, 1–6. <http://dx.doi.org/10.1088/1748-9326/6/1/019501>.

7. Morozov Yu.P. et al. (2019) *Енергетична ефективність використання перших від поверхні водонасних горизонтів*

zontiv dlia teplo- i khladopostachannia. [Energy efficiency of using the first aquifers from the surface for heating and cooling]. *Vidnovliuvana enerhetyka*, 2, 70–78 [in Ukrainian]. [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2019.2\(57\).70-78](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2019.2(57).70-78).

8. Zurian O.V. (2019) Comparison of efficiency of geothermal and hydrothermal energy systems. *XIX International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM. Renewable Energy Sources and Clean Tech. Varna. Bulgaria*, 83–90. <https://doi.org/10.5593/sgem2019/4.1/S17.011>.

9. Malkin E.S., Kulinko Ye.O. (2014) Perspektyvy ta aspekty zastosuvannia system teplokhodopostachannia, yaki vykorystovuiut pry poverkhnevi shary vody v yakosti teplovoho akumulatora. [Prospects and aspects of the application of heat and cold supply systems that use near-surface layers of water as a heat accumulator]. *Ventylatsiia, osvillennia ta teplozhazopostachannia*, 17, 63–69 [in Ukrainian].

10. Denisov O.I. (2010) Porivnialnyi enerhetychni analiz teplovykh nasosiv i tradytsiinykh system opalennia [Comparative energy analysis of heat pumps and traditional heating systems] *Tekhnicheskaya teplofizika i promyshlennaya teploenergetika*, 2, 22–34 [in Ukrainian].

11. Bayer P., Saner D., Bolay S., Rybach L., Blum, P. (2012) Greenhouse gas emission savings of ground source heat pump systems in Europe: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16, 1256–1267. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.09.027>.

12. Zurian O.V., Oliinichenko V.H. (2021) Hidrotermalna systema otrymannia teplovoi enerhii, fizychni protsesy, efektyvnist. [Hydrothermal system for obtaining thermal energy, physical processes, efficiency]. *Visnyk Vinnytskoho politekhnichnogo instytutu*, 4, 40–46 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2021-157-4-40-46>.

13. Zurian O., Barilo A. (2022) Impact of the natural temperature regime of the upper layers of Earth on efficiency of a hydrothermal heat pump system. *Journal of Geology, Geography and Geoecology*, 3, 575–584. <https://doi.org/10.15421/112254>.

14. Zurian O.V. (2021) *Eksperymentalni doslidzhennia teplovoho rezhymu hidrotermalnoi teplonasosnoi systemy*. [Experimental studies of the thermal regime of the hydrothermal heat pump system]. *Vidnovliuvana enerhetyka*, 4, 77–89 [in Ukrainian]. [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2021.4\(67\).77-89](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2021.4(67).77-89).

15. Morozov Yu.P., Chalaev D.M., Olynichenko V.G., Velichko V.V. (2019) Eksperymentalne doslidzhennia dobovoho akumuluvannia kholodu shliakhom vykorystannia vody pidzemnykh horizontiv m. Kyieva. [Experimental study of daily accumulation of cold by using water from the underground horizons of the city of Kyiv]. *Renewable energy*, 3, 67–77 [in Ukrainian]. [https://doi.org/10.36296/1819-058.2019.3\(58\).67-77](https://doi.org/10.36296/1819-058.2019.3(58).67-77).

16. Kudria S.O., Morozov Yu.P., Kuznietsov M.P. (2013) Doslidzhennia efektyvnosti kombinovanoho vykorystannia enerhii vitru, sentsia i teploty zemli dlia otrymannia vodniu pry elektrolizi vody. Voden v alternatyvni enerhetytsi ta novitnikh tekhnolohiiakh [Research on the effectiveness

of the combined use of wind, sun and earth's heat to obtain hydrogen during water electrolysis. Hydrogen in alternative energy and the latest technologies]: *Tezy dop. naukovoї zvitnoi sesii NAN Ukrainy* [in Ukrainian].

17. Matiakh S.V., Surzhyk T.V., Reztsov V.F. (2020) Vyznachennia efektyvnosti vprovadzhennia system soniachnogo hariachoho vodopostachannia [Determining the effectiveness of the implementation of solar hot water supply systems]. *Vidnovliuvana ta vodneva enerhetyka*, 1(60), 17–22 [in Ukrainian]. [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2020.1\(60\).17-22](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2020.1(60).17-22).

18. Zurian O.V. (2016) Kombinovani enerhosystemy dlia efektyvnoho otrymannia ekolohichno bezpechnoi enerhii. [Combined energy systems for efficient production of environmentally safe energy] *Ekolohiia ta promyslovisyt*, 3, 96–100 [in Ukrainian].

19. Tymchuk S.O. (2016) Pryiniattia optymalnykh rishen pry keruvanni hibrydnymy elektrychnymy merezhamy z vidnovliuvannykh dzherelamy enerhii [Making optimal decisions when managing hybrid electrical networks with renewable energy sources]. *Elektromekhanichni i enerhozberihaiuchi systemy*, № 2 (34), 55–61 [in Ukrainian].

20. Tiba C., Candeias A.L.B., Fraidenraich N. et al. (2010) A GIS-based decision support tool for renewable energy management and planning in semi-arid rural environments of northeast of Brazil // *Renewable Energy*, 35, 2921–2932.

21. Dagdougui H., Minciardi R., Ouammi A. et al. (2010) A dynamic optimization model for smart micro-grid: integration of a mix of renewable resources for a green building // *Proceedings of the 2010 International Congress on Environmental Modelling and Software*. Canada: Ottawa.

22. Maksymenko I.M. (2007) Avtomatyzatsiia system zabezpechennia zadanoi temperatury z alternatyvnymy dzherelamy enerhii [Automation of systems for providing a set temperature with alternative energy sources]: *avto-ref. dys. na zdobuttia nauk. stupenia kand. tekhn. nauk: spets. 05.13.07 «Avtomatyzatsiia tekhnolohichnykh protsesiv» / Maksymenko I. M. – Odesa* [in Ukrainian].

23. Zurian O.V., Matiakh S.V. (2023) Systema upravlinnia enerhetychnym klasterom na osnovi teplovoho nasosu. [Energy cluster management system based on a heat pump.] *Vidnovliuvana enerhetyka*, 2, 92–99 [in Ukrainian]. [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2023.2\(73\)92-99](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2023.2(73)92-99).

24. Zurian O.V., Oliinichenko V.H. (2023) Efektyvnist roboty bufernoho nakopychuvacha hidrotermalnoi teplonasosnoi systemy yak akumulatora teplovoi enerhii. [The efficiency of the buffer storage of the hydrothermal heat pump system as a thermal energy accumulator] *Vidnovliuvana enerhetyka*, 1(72), 69–80 [in Ukrainian]. [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2023.1\(72\).69-80](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2023.1(72).69-80).

25. Irodov V.F., Chornomorets G.Y., Barsuk R.V. (2020) Multiobjective Optimization at Evolutionary Search with Binary Choice Relation. [Multiobjective optimization in evolutionary search with a binary choice relation]. *Cybernetics and Systems Analysis*, 56, 449–454 [in Ukrainian].

Стаття надійшла 04.10.2023