

УДК 697.4+697.5

аспірант **Кирило Баранчук**,

kyrylo.baranchuk@danfoss.com, ORCID: 0000-0003-4491-9396

Київський національний університет будівництва і архітектури,

доцент **Олександр Любарець**,

liubarets.op@knuba.edu.ua, ORCID: 0000-0003-1905-9283,

Київський національний університет будівництва і архітектури

ЕВОЛЮЦІЯ ТЕПЛОВИХ ПУНКТИВ: ВІД ПАРОВИХ СИСТЕМ ДО ТЕПЛОВИХ ПРОСЬЮМЕРІВ

Анотація. Теплові пункти є ключовою ланкою систем централізованого теплопостачання (ЦТ), що забезпечує ефективний розподіл теплової енергії між джерелом і споживачем. У статті розглянуто етапи еволюції теплових пунктів — від ранніх парових систем до сучасних індивідуальних теплових пунктів (ІТП) з розширеними функціями керування. Особливу увагу приділено новітньому поколінню — двонаправленим ІТП (2Н-ІТП), які поєднують традиційні компоненти з можливістю залучення локальних джерел теплоти, зокрема теплових насосів, сонячних колекторів та технологічної відпрацьованої теплоти. Такі системи дозволяють не лише споживати теплоту з мережі, але й повертати надлишкову енергію до системи ЦТ за наявності відповідної інфраструктури. 2Н-ІТП сприяють формуванню теплових просьюмерів — активних споживачів і виробників теплоти, що відкриває нові можливості для балансування навантажень, зменшення викидів та інтеграції відновлюваних джерел енергії (ВДЕ). Впровадження таких рішень відповідає цілям оновленої Директиви ЄС з енергоефективності (EU/2023/1791), зокрема щодо розвитку сталого та гнучкого теплопостачання. Стаття узагальнює сучасні підходи до технічної реалізації 2Н-ІТП та їх роль у трансформації систем теплопостачання в умовах децентралізації та декарбонізації.

Ключові слова: централізоване теплопостачання, теплові просьюмери, відновлювані джерела енергії, теплові пункти, енергетична ефективність, децентралізація.

Постановка проблеми. Індивідуальний тепловий пункт (ІТП) є ключовою ланкою між системою централізованого теплопостачання (ЦТ) та внутрішніми системами будівель. З моменту появи систем ЦТ їх роль постійно змінювалася — від простого розподілу теплоносія до адаптивного вузла, здатного забезпечувати енергоефективність і комфорт. Сучасні виклики декарбонізації,

децентралізації та цифровізації теплової енергетики стимулюють подальшу трансформацію ІТП.

Останнім етапом цієї еволюції є поява двонаправлених ІТП (2Н-ІТП), що не лише споживають теплоту з мережі, а й можуть повертати надлишок теплоти, отриманий з локальних джерел. Такі рішення відкривають нові можливості для підвищення гнучкості, залучення відновлюваних джерел енергії (ВДЕ), створення локальних ринків теплоти та формування теплових просьюмерів.

Попри очевидні переваги, широке впровадження 2Н-ІТП гальмується відсутністю типових схем, регуляторних механізмів та системного бачення їхньої ролі в майбутній архітектурі теплопостачання. У цьому контексті важливо проаналізувати еволюцію ІТП, визначити техніко-функціональні відмінності нових рішень та продемонструвати перспективи застосування 2Н-ІТП як елемента оновленої інфраструктури централізованого теплопостачання.

Актуальність дослідження. У контексті трансформації енергетичного сектору та посилення кліматичних зобов'язань зростає потреба в адаптації інфраструктури систем ЦТ до нових умов — підвищення гнучкості, залучення ВДЕ та участі споживачів у генеруванні теплоти. Теплові пункти, як ключова ланка між мережею та будівлею, відіграють вирішальну роль у цій трансформації. Розвиток 2Н-ІТП відкриває можливості для формування теплових просьюмерів (суб'єктів енергопостачання, які більше виробляють енергії ніж споживають і продають залишок), оптимізації енергопотоків і створення локальних теплових ринків. Дослідження є актуальним з огляду на потребу у практичному та концептуальному переосмисленні функціональності ІТП в новій енергетичній парадигмі.

Останні дослідження та публікації. Останні дослідження засвідчують, що теплові пункти нового покоління мають відігравати активну роль у декарбонізації ЦТ, особливо в умовах впровадження концепцій 4-го та 5-го поколінь. Серед ключових напрямків розвитку ІТП виділяється перехід до 2Н-ІТП, які, на відміну від класичних, дозволяють як споживати теплоту з мережі, так і передавати в неї надлишкову теплоту від локальних джерел.

У роботах Pipiciello et al. (2021) [1] та Sdringola et al. (2023) [2] обґрунтовано необхідність впровадження нової архітектури ІТП для залучення будівель-просьюмерів у гнучкі тепломережі. Frison et al. (2023) [3] продемонстрували ефективність використання локальних ВДЕ у поєднанні з тепловими накопичувачами та алгоритмами прогнозованого управління моделі (MPC) для зменшення споживання теплоти від центрального джерела. У свою чергу, Anania et al. (2025) [4] змоделювали роботу 2Н-ІТП з тепловими насосами і довели можливість зменшення первинного енергоспоживання до

75 % при поєднанні з відпрацьованою теплотою.

Водночас, у літературі окреслено низку викликів, що стримують масштабне впровадження двонаправлених ІТП. Зокрема:

- відсутність ринку теплоти або механізмів локальної торгівлі (особливо в країнах із субсидованим тарифоутворенням) [5];
- технічні складнощі залучення реверсивних потоків до традиційних мереж з незворотним гідравлічним опором [6];
- необхідність розроблення стандартів і типових архітектур для двонаправлених ІТП [7];
- відсутність довготривалих польових випробувань у масштабних мережах [2,8].

Таким чином, хоча концепція теплових просьюмерів та двонаправлених теплових пунктів уже активно досліджується, більшість робіт базуються на моделюванні або пілотних проєктах. Дана стаття спрямована на подальше систематизування тенденцій еволюції ІТП та визначення місця 2Н-ІТП у майбутній архітектурі ЦТ.

Формулювання цілей статті. Метою статті є проаналізувати еволюцію теплових пунктів у контексті розвитку систем ЦТ та запропонувати типову архітектуру 2Н-ІТП, що враховує сучасні вимоги до залучення ВДЕ та джерел скидної теплоти. Робота спрямована на узагальнення техніко-технологічних тенденцій та формування основ для подальших прикладних рішень у галузі модернізування теплових систем.

Перше покоління ІТП з'явилося разом із формуванням парових систем ЦТ наприкінці XIX століття. Першу комерційно успішну систему ЦТ було реалізовано у 1877 році в місті Локпорт (штат Нью-Йорк, США) за проєктом Бердсілла Холлі. Ця система стала не лише технічною інновацією, а й інженерним проривом: вже через десятиліття аналогічні рішення були впроваджені у понад 20 містах Сполучених Штатів. Її ключова особливість — використання пари як теплоносія з подаванням під високим тиском безпосередньо до будівель.

ІТП першого покоління функціювали як вузли локального теплообміну між мережею та внутрішньою системою гарячого водопостачання або опалення. На той час вони не мали циркуляційних насосів чи складних систем керування, але вже забезпечували базове регулювання параметрів споживання завдяки регуляторам температури прямої дії. Основним елементом такого ІТП був кожухотрубний теплообмінник, у якому відбувалося передавання теплоти від пари до води, а також блок відведення конденсату, що замикав цикл теплоносія.

З технічного боку, ці ІТП містили також регулятори тиску пари та перші теплові лічильники, що стали прототипами сучасних засобів комерційного

обліку теплової енергії. Винаходи того часу, зокрема патент США № 246952 на регулятор тиску (1881) та патент № 241217 на тепловий лічильник (1881), заклали основу для подальшої еволюції індивідуальних теплових пунктів [9].

ІТП другого покоління сформувались у рамках радянської моделі ЦТ, що домінувала в більшості країн пострадянського простору. Цей етап розвитку був менш гнучким з огляду на джерела енергії, проте вирізнявся високою варіативністю схем технічної реалізації ІТП — особливо стосовно залежних та незалежних конфігурацій, типів теплообмінників та схем гарячого водопостачання.

Приєднання споживачів до мереж здійснювалося як безпосередньо, так і через центральні теплові пункти (ЦТП), які забезпечували групове обслуговування будівель. Основними причинами використання ЦТП були габаритні обмеження, акустичні характеристики обладнання та прагнення до зниження капітальних витрат шляхом централізації.

ЦТП були оснащені простими пристроями автоматизації — регуляторами прямої дії, нерегульованими насосами та релейними щитами керування. З боку кінцевого споживача, як правило, встановлювалися нерегульовані схеми без теплового обліку, що ускладнювало енергетичне планування та балансування.

Класифікація ІТП другого покоління [10–12] базувалася на двох ключових ознаках:

- За типом приєднання опалення та вентиляції:
 - залежні схеми (наприклад, з використанням гідроелеваторів),
 - незалежні схеми (кожухотрубні або пластинчасті теплообмінники);
- За схемою приєднання систем гарячого водопостачання (ГВП):
 - паралельна, змішана, послідовна (одно- або двоступенева),
 - відкрита (з безпосереднім розбором з теплової мережі).

Недоліки ЦТП/ІТП другого покоління:

- дублювання систем регулювання (в ЦТП та на рівні будівель);
- велика кількість проміжних теплообмінників, що ускладнює перехід до низькотемпературних систем.
- відсутність регулювання та приладів обліку;
- низький коефіцієнт корисної дії гідроелеваторних схем;
- слабе гідравлічне балансування через ручні засоби регулювання.

У 1980–1990-х роках спостерігалось поступове впровадження електронних контролерів замість регуляторів прямої дії. Це стало початком переходу до ІТП третього покоління з підвищеним рівнем автоматизації, адаптивністю до зовнішніх умов та більшою енергоефективністю.

Третє покоління ІТП стало важливою віхою в еволюції ЦТ. Воно ознаменувало перехід від громіздких, малоавтоматизованих систем до

компактних, енергоефективних та інтелектуально керованих рішень. В Україні саме зараз активно відбувається модернізація за цими принципами, зокрема в межах програм термомодернізації житлового фонду та оновлення інфраструктури ЦТ.

Ключові технічні ознаки ІТП третього покоління:

- компактність та зниження металомісткості (серійне виробництво сучасних регулювальних клапанів, теплообмінників і насосів дозволило суттєво зменшити розміри ІТП);
- зниження рівня шуму (нове насосне обладнання стало придатним для встановлення у підвальних приміщеннях житлових будинків);
- автоматизація (масове впровадження мікропроцесорних контролерів, електроприводів, а також перших SCADA-систем з використанням стандартних протоколів Modbus RTU/TCP і RS-485);
- автоматичне обмеження витрати (вперше широко застосовуються регулятори перепаду тиску в парі з регулювальними клапанами, що підвищило точність та стабільність роботи);
- гнучкі схеми (рис. 1) приєднання (використовуються як залежні, переважно для малоповерхової забудови, так і незалежні схеми приєднання опалення та вентиляції, а паралельне приєднання ГВП (рис. 2): стало стандартом для швидкої та стабільної реакції системи);
- віддалене керування: широке впровадження SCADA-платформ дозволило здійснювати моніторинг і керування ІТП в режимі реального часу.

Таким чином, ІТП третього покоління задали новий стандарт для індивідуального регулювання, енергетичного обліку та цифрового керування, що нині актуально реалізується в Україні на етапі оновлення інфраструктури ЦТ.

ІТП четвертого покоління є відповіддю на виклики децентралізації, низькотемпературного теплопостачання (НТЦТ) і глибокого інтегрування ВДЕ. Їхні ключові риси:

- технологічні інновації:
 - компактність і зниження металоємності завдяки комбінованим клапанам і пластинчастим теплообмінникам нового покоління;
 - інтелектуальні приводи забезпечують точне регулювання, стабільну температуру і мінімальні коливання завдяки вбудованим регуляторам перепаду тиску;
 - низький рівень шуму завдяки застосуванню двигунів насосів із частотним регулюванням;

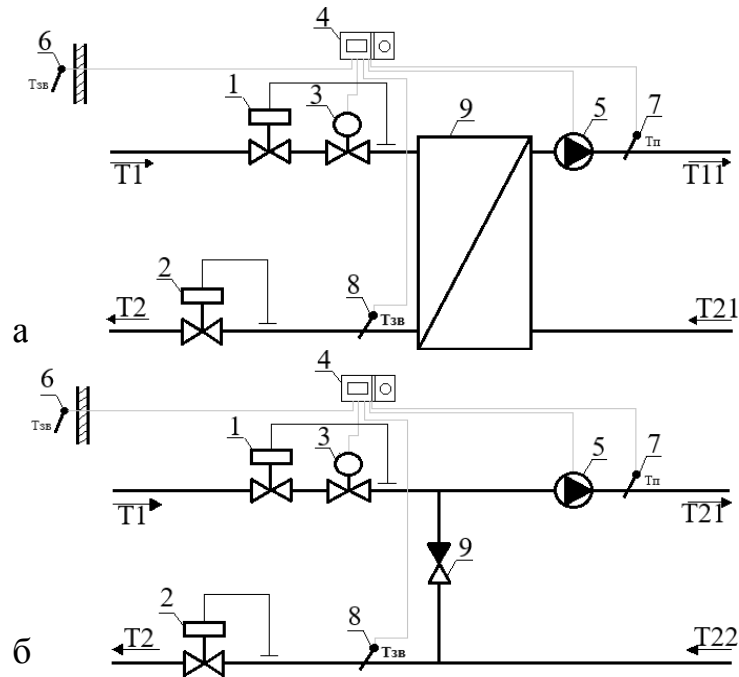


Рис.1 Схеми приєднання систем опалення та/або інших теплоспоживаючих установок: а – незалежна; б – залежна:

1 – регулятор перепаду тиску, 2 – регулятор тиску «до себе» (у випадках, коли тиск в зворотному трубопроводі нижче за статичний), 3 – регулювальний клапан з електроприводом, 4 – електронний регулятор, 5 – циркуляційний насос, 6 – датчик температури зовнішнього повітря, 7 – датчик температури води в системі опалення, 8 – датчик температури води в зворотному трубопроводі, 9- зворотній клапан на змішувальній перемичці/теплообмінник.

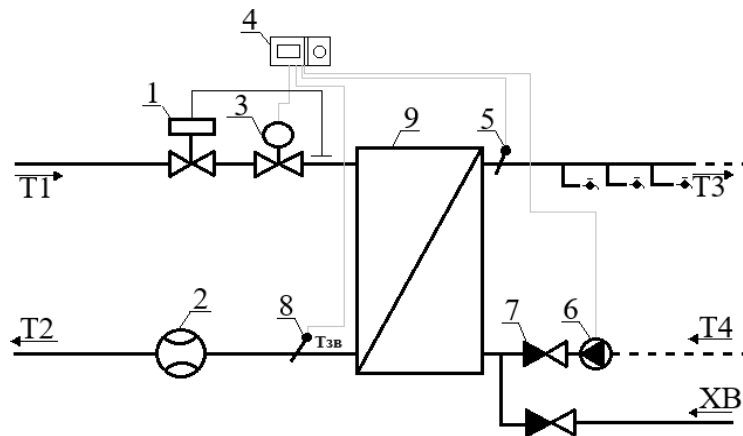


Рис.2 Принципова схема паралельного приєднання системи ГВП в ТП третього покоління:

1 – регулятор перепаду тиску, 2 – прилад обліку теплової енергії, 3 – регулювальний клапан з електроприводом, 4 – електронний регулятор, 5 – датчик температури води, що надходить в систему ГВП, 6 – насос рециркуляції, 7 – зворотний клапан, 8 – датчик температури води в зворотному трубопроводі, 9 – теплообмінник (зазвичай паяний або розбірний пластинчатий).

- сучасна комунікація, підтримання дротових (Modbus RTU/TCP, RS-485) та бездротових інтерфейсів (Bluetooth, 4G/5G) для налаштування та моніторингу;
- SCADA зі штучним інтелектом, впровадження відкритих платформ з аналітикою і самонавчанням;
- нові типи теплових пунктів:
 - з догріванням (локальні теплові насоси для ГВП);
 - комбіновані (комбінація ЦТ та локальних ВДЕ);
 - 2Н-ІТП — з можливістю передачі надлишкової теплоти у мережу.

Схеми приєднання опалення залишаються незмінними – залежна та незалежна (рис. 3).

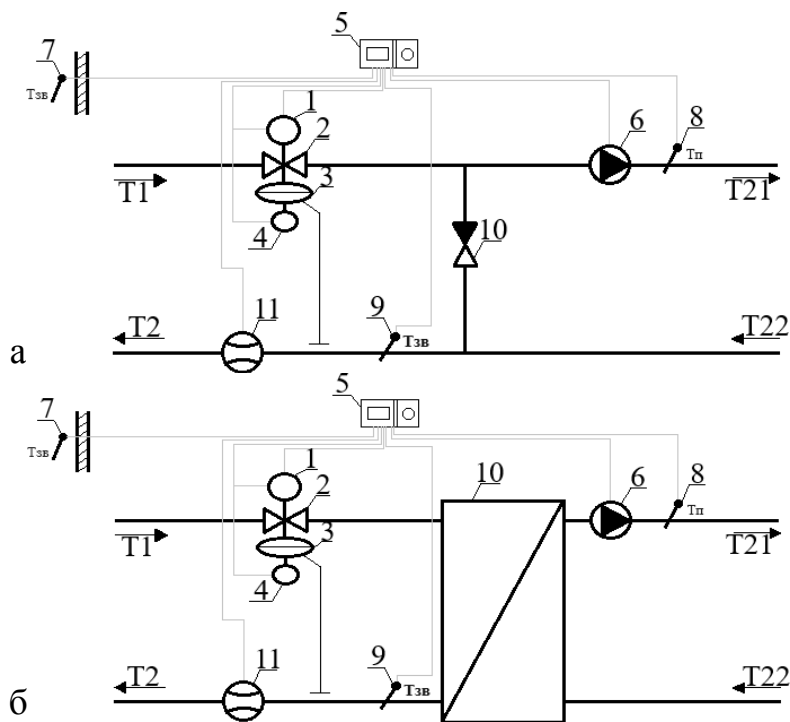


Рис.3. Схеми приєднання систем опалення та/або інших теплоспоживаючих установок: а – незалежна; б – залежна:

1 – електричний привід регулювального клапана; 2 – комбінований регулювальний клапан; 3 – регулювальний елемент (перепад тиску); 4 – інтелектуальний електропривід регулювального елементу (опціонально);

5 – електронний регулятор; 6 – циркуляційний насос; 7 – датчик температури зовнішнього повітря; 8 – датчик температури води в системі опалення; 9 – датчик температури води в зворотному трубопроводі; 10 – теплообмінник; 11 – тепловий лічильник

Система ГВП четвертого покоління можуть працювати з низькими мережевими температурами, але це потребує уваги до санітарних ризиків, зокрема розвитку бактерій роду *Legionella*:

- температури в точках розбору мають бути не менше ніж 50°C ;
- у баках-акумуляторах слід підтримувати температуру до 60°C , щоб запобігти розвитку бактерії;

Найпоширеніша схема — паралельне приєднання ГВП з баком-акумулятором (рис. 4).

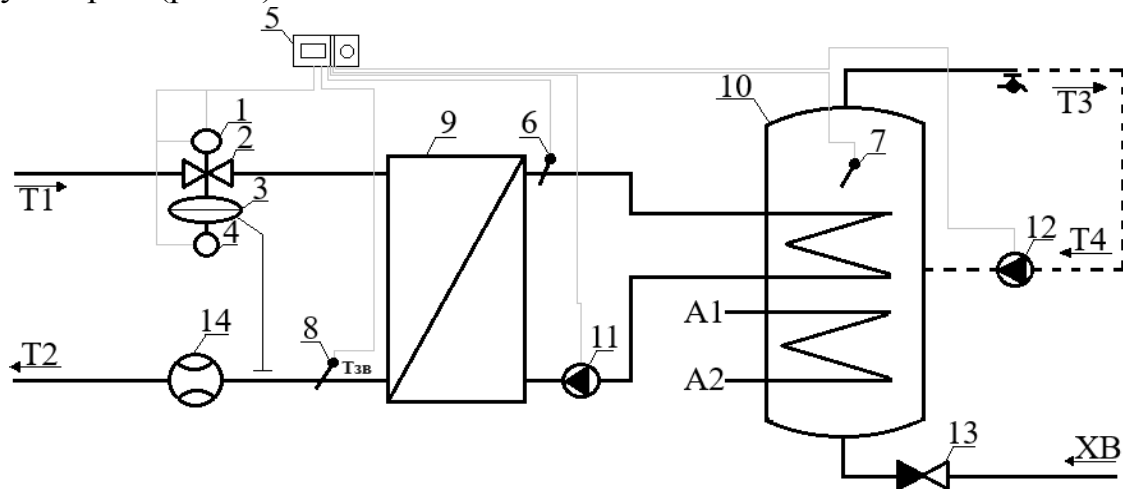


Рис. 4 Принципова схема приєднання системи ГВП з баком-акумулятором

1 — електричний привід регулювального клапана, 2 — комбінований регулювальний клапан, 3 — регулювальний елемент (перепад тиску), 4 — інтелектуальний електропривід регулювального елемента (опціонально), 5 — електронний регулятор, 6 — датчик температури води на завантаження баку-акумулятора, 7 — датчик температури води в баці-акумуляторі, 8 — датчик температури води в зворотному трубопроводі, 9 — теплообмінник (зазвичай паяний або розбірний пластинчатий), 10 — бак-акумулятор, 11 — насос завантаження бака-акумулятора, 12 — насос рециркуляції, 13 — зворотній клапан, 14 — тепловий лічильник. A1 та A2 — точки приєднання бустера для догріву (наприклад, тепловий насос).

Розроблення стандартизованої схеми 2Н-ІТП. Залучення локальних джерел теплоти до систем ЦТ вимагає нових технічних рішень, які забезпечують двосторонню взаємодію споживача з мережею. У цьому контексті особливої актуальності набуває концепція 2Н-ІТП, що дозволяє не лише споживати теплову енергію з мережі ЦТ, а й подавати надлишок локального теплоти назад у систему. З урахуванням розглянутого досвіду запропоновано принципову схему 2Н-ІТП відповідно до рис 5. Її основою є комбінація двох джерел теплової енергії — ЦТ та локального ВДЕ.

Залежно від обраного локального джерела теплоти, запропоновано три типові конфігурації системи:

- тепловий насос (ТН). Застосовуються повітряні, геотермальні або вода–вода системи. У нічний час або при низькому навантаженні ТН може генерувати надлишок теплоти, який накопичується або передається в мережу. Це дозволяє вирівнювати добові коливання споживання та підвищувати загальну ефективність системи.
- сонячні колектори. Геліосистеми, розташовані на даху чи фасаді, передають теплоту до бака-акумулятора. При надлишковому генеруванні тепла енергія може бути передана назад до ЦТ. Основне обмеження — нестабільність генерування через погодні умови, що зумовлює потребу у комбінованій роботі з ЦТ.
- скидна теплота. Утилізація теплоти з промислових установок, вентиляційних систем, дата-центрів тощо. Залежно від температурного рівня, воно або напрямку використовується через теплообмінник (5), або проходить через ТН для підвищення потенціалу. У разі надлишку така енергія також повертається до мережі ЦТ.

Таким чином, схема 2Н-ІТП забезпечує три режими роботи:

- споживання теплоти з ЦТ;
- комбіноване генерування з локальним джерелом;
- експорту надлишку до мережі.

Запропоноване рішення дозволяє гнучко адаптуватися до змінних навантажень, підтримувати енергоефективність системи та розширити роль кінцевого споживача в енергетичній інфраструктурі. При розробленні був проведений порівняльний аналіз традиційних ІТП та кількох конфігурацій 2Н-ІТП з різними типами локальних джерел (табл. 1). Це дозволяє оцінити переваги, обмеження й потенціал кожного варіанту щодо залучення ВДЕ в сучасні системи теплопостачання та оптимізування енергоспоживання будівель.

Висновки. ІТП пройшли чотири покоління розвитку від перших парових до сучасних інтелектуальних рішень з підтриманням двонаправленого теплового потоку. Запропонована архітектура 2Н-ІТП дозволяє гнучко комбінувати теплоту з централізованої мережі та локальних джерел, як-от теплові насоси, сонячні колектори або скидна теплота, з можливістю експорту надлишкової енергії назад у мережу. Розроблена принципова схема 2Н-ІТП забезпечує ефективне теплопостачання, підвищену енергоефективність, оптимізацію споживання ресурсів, а також сприяє реалізації концепції теплових просьюмерів. Проведений порівняльний аналіз конфігурацій показав особливості та потенціал залучення різних типів локальних джерел в сучасні системи ЦТ з урахуванням технічних та експлуатаційних факторів.

Таблиця 1. Порівняльна таблиця характеристик ІТП та 2Н-ІТП

Критерій	Традиційний ІТП, схема:		2Н-ІТП з		
	залежна	незалежна	тепловим насосом	сонячними колекторами	споживанням скидної теплоти
Джерело тепло-ти	Тільки ЦТ	Тільки ЦТ	ЦТ + теплота від теплового насоса (ВДЕ, електроенергія)	ЦТ + сонячна теплота (ВДЕ, геліоколектори)	ЦТ + місцева скидна теплота (утилізація)
Гнуч-кість регулювання	Обмежена: залежить від параметрів мережі, вплив змішування.	Вища: прогнозовані параметри теплообмінника дозволяють досягти більшої стабільності регулювання	Дуже висока: можливість змінювати режим роботи ТН, підлаштовувати температуру під потреби	Помірна: непостійність сонячного ресурсу з більшою потребою в прогнозуванні	Висока: може перемикатися між мережевим і власним теплом в реальному часі
Експорт тепло-ти в мережу ЦТ	Ні – конструктивно не передбачено.	Ні – теплообмінник працює тільки в одному напрямку.	Так – тепловий насос може передавати надлишок в мережу ЦТ	Так – надлишок сонячної теплоти в разі його наявності може надходити в мережу ЦТ	Так – скидна теплота при надлишку може надходити в мережу ЦТ
Зниження пікових навантажень	Ні, повністю залежить від зовнішнього джерела в піки.	Ні, повністю залежить від зовнішнього джерела в піки.	Так/Частково – може покривати піки за рахунок ТН залежно від його типу, зменшуючи споживання від ЦТ	Частково – в сонячні години зимового дня пікове навантаження зменшується, але вночі – ні.	Так/Частково – скидна теплота знижує споживання з мережі ЦТ і, враховуючі більшість технологічних процесів, є постійно доступним.
Рівень автоматизації	Базовий: найнижча кількість компонентів	Базовий: кількість компонентів доповнюється елементами керування в контурі підживлення та вимірюванням додаткових параметрів	Високий: складна система керування кількома контурами, електронний регулятор та контролер ТН. Необхідність прогнозування та інтеграції в smart grid	Середній: автоматичне керування розподілом теплоти від сонячних колекторів, контроль від перевищення температури, в окремих випадках декілька електронних регуляторів в одній системі.	Високий: складна система керування з кількома контурами і контролем параметрів якості та кількості скидної теплоти, в окремих випадках з керуванням ТН
Стабільність теплопостачання	Низька: при збоях у роботі системи ЦТ опалення будинку одразу зупиняється	Середня: система ЦТ і будинок розділені – аварії на магістралі не призводять до миттєвого порушення в роботі вторинного контуру	Висока: є резерв у вигляді ТН; при припиненні функціонування ЦТ ТН може частково або повністю покривати потреби в теплі.	Середня: за відсутності сонця покладається на систему ЦТ. При аварії в системі ЦТ вторинний контур продовжує працювати, як при незалежній схемі приєднання.	Висока: два джерела (мережа та скидна теплота) підвищують надійність. Скидна теплота може повністю задовільнити попит.

Закінчення таблиці 1

Критерій	Традиційний ІТП, схема:		2Н-ІТП з		
Витрати на обслуговування	Низькі: мінімум обладнання.	Помірні: потрібно обслуговування теплообмінника, більша кількість елементів	Вищі: обслуговування компресора, декількох теплообмінників, бака-акумулятора, системи автоматизації ТН.	Вищі: періодична перевірка колекторів, обслуговування декількох теплообмінників, бака-акумулятора, системи автоматизації та контролю за роботою колекторів.	Вищі: необхідне обслуговування теплообмінника, з'єднаного з контуром скидної теплоти чи ТН, а також обслуговування декількох теплообмінників, бака-акумулятора.
Надійність системи	Середня: мало компонентів, але повна залежність від мережі знижує загальну надійність.	Висока: гідравлічне розділення та стандартний набір обладнання призводить до високої загальної надійності	Середня/висока: складніший, більше вузлів, однак наявність ТН підвищує стійкість до збоїв в системі ЦТ.	Середня: залежність від погоди робить виробництво теплоти нестабільним, але обладнання саме по собі просте і надійне.	Висока: джерело скидної теплоти часто працює постійно. Висока надійність елементів в технологічному процесі (резервне живлення тощо).
Залучення охолодження в майбутньому	Ні, тільки ЦТ	Ні, тільки ЦТ	Так, за реверсивної роботи ТН або пасивного охолодження за рахунок ТН (при відповідному технічному оснащенні інженерної системи будівлі)	Ні, тільки спільна робота ЦТ + сонячне тепло	Так, в разі використання ТН в процесі утилізації скидної теплоти (при відповідному технічному оснащенні інженерної системи будівлі)

Перспективи подальших досліджень. Надалі доцільно розробляти алгоритми керування 2Н-ІТП, зокрема моделі предиктивного регулювання, засновані на погодних прогнозах та змінному тепловому навантаженні. Перспективними є дослідження впливу 2Н-ІТП на гідравлічний режим тепломереж в умовах масового впровадження, оцінювання комерційної доцільності впровадження моделей теплових просьюмерів і розроблення стандартів для типових архітектур ІТП.

References

1. Pipiciello M et al. "The bidirectional substation for district heating users: experimental performance assessment with operational profiles of prosumer loads and distributed generation." *Energy and Buildings*, vol. 305, 2024), p. 113872.
2. Sdringola, Paolo, et al. "Modelling a prototype of bidirectional substation for district heating with thermal prosumers." *Sustainability*, vol. 15.6, 2023, p. 4938.

3. Frison, Lilli, et al. "Model predictive control of bidirectional heat transfer in prosumer-based solar district heating networks." *Applied Energy*, Vol. 358, 2024, p. 122617.
4. Anania D. et al. "Thermal-hydraulic modelling of a flexible substation layout for low-temperature waste heat recovery into district heating." *Energy*, Vol. 328, 2025, p. 136386.
5. Johansen K, Sven W. "Something is sustainable in the state of Denmark: A review of the Danish district heating sector." *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 158, 2022, p. 112117.
6. Angelidis Orestis, et al. "District heating and cooling networks with decentralised energy substations: Opportunities and barriers for holistic energy system decarbonisation." *Energy*, vol. 269, 2023, p. 126740.
7. Zinsmeister Daniel, et al. "A comparison of prosumer system configurations in district heating networks." *Energy Reports*, vol. 7, 2021, pp. 430-439.
8. Dino G. E. et al. "Modeling of a bidirectional substation in a district heating network: Validation, dynamic analysis, and application to a solar prosumer." *Energy*, vol. 284, 2023, pp. 128621.
9. Gallo Emmanuelle. "Skyscrapers and District Heating, an inter-related History 1876-1933." *Construction History*, vol. 19, 2003, pp. 87-106.
10. Zinger N. M., Bestolchenko, V. H., & Zhydkov, A. A. "Povyshenie effektivnosti raboty teplovykh punktov." *Stroiizdat*, 1990.
11. Zinger N. M.. "Hidravlicheskie i teplovye rezhimy teplofikatsionnykh sistem." 1986
12. Gromov N. K. "Abonentskie ustroistva vodianykh neplovykh setei." 1979.

UDC 697.4+697.5

PhD Student, **Kyrylo Baranchuk**,
kyrylo.baranchuk@danfoss.com, ORCID: 0000-0003-4491-9396

Associate Professor, **Oleksandr Liubarets**
liubarets.op@knuba.edu.ua, ORCID: 0000-0003-1905-9283,
Kyiv National University of Construction and Architecture

EVOLUTION OF HEATING SUBSTATION: FROM STEAM SYSTEMS TO THERMAL PROSUMERS

Abstract. Heating substations are a key component of district heating (DH) systems, enabling the efficient transfer, regulation, and optimization of thermal energy flows between centralized energy sources and building-level consumption systems. This article provides a comprehensive overview of the evolution of heating substations, tracing their development from early high-temperature steam networks to today's advanced, low-temperature, and digitally controlled systems. A particular focus is placed on bidirectional heating substations — the latest stage of this evolution — which integrate local renewable and residual heat sources (heat pumps, solar thermal collectors, industrial waste heat) alongside traditional DH infrastructure. Such substations not only allow flexible heat consumption from the DH network but also provide the capability to inject surplus thermal energy back into the grid. This supports the transition towards thermal prosumer models, where consumers become active participants in local energy balancing, helping to improve system-wide flexibility, increase the share of renewables, and contribute to significant CO₂ emission reductions. The article reviews technical solutions and control strategies for implementing bidirectional substations and assesses their role in transforming DH networks into more intelligent, decentralized, and low-carbon energy infrastructures. These developments are in line with the strategic goals of the revised EU Energy Efficiency Directive (EU/2023/1791), which emphasizes the modernization of heat supply systems as a key pathway to achieving climate neutrality. The results underline the potential of bidirectional heating substations technologies to serve as critical enablers for sector coupling and for the future integration of heating into holistic smart energy systems.

Keywords: district heating, thermal prosumers, renewable energy sources, heating substations, energy efficiency, decentralization.