

УДК 620.9  
UDC 620.9

DOI:10.33744/0365-8171-2025-117.1-044-054

ОГЛЯД СУЧАСНИХ АРХІТЕКТУР ДВОНАПРАВЛЕНИХ ІНДИВІДУАЛЬНИХ  
ТЕПЛОВИХ ПУНКТІВ В СИСТЕМАХ ЦЕНТРАЛІЗОВАНОГО ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ НА  
ОБ'ЄКТАХ ТРАНСПОРТНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ

OVERVIEW OF MODERN ARCHITECTURES OF BIDIRECTIONAL HEATING  
SUBSTATION IN DISTRICT HEATING SYSTEMS ON TRANSPORT INFRASTRUCTURE  
FACILITIES



*Баранчук Кирило Олексійович, аспірант кафедри теплотехніки, Національний університет будівництва та архітектури, м. Київ, Україна. Заступник директора з науково-технічної діяльності, ТОВ з її "Данфосс ТОВ" e-mail: [kyrylo.baranchuk@danfoss.com](mailto:kyrylo.baranchuk@danfoss.com), тел. +380504125633.*

<https://orcid.org/0000-0003-4491-9396>



*Чечуга Олександр Сергійович, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри транспортного будівництва та управління майном, Національний транспортний університет, м. Київ, Україна, e-mail: [chchuga77@gmail.com](mailto:chchuga77@gmail.com), тел. +380662019442*

<https://orcid.org/0000-0003-1643-6354>

**Анотація:** Сучасні системи централізованого теплопостачання четвертого (4ПЦТ) та централізованого тепло- та холодопостачання п'ятого (5ПЦТХ) поколінь усе ширше інтегрують відновлювані джерела енергії (ВДЕ) та вторинне тепло, водночас змінюючи роль споживачів на активних «теплових просьюмерів», особливо в характерних кластерно розміщених будівлях і спорудах, зокрема а виробничих агломераціях транспортних господарств. Ключовим елементом такої двосторонньої взаємодії між мережею і будівлею виступає двонаправлений індивідуальний тепловий пункт (2Н-ІТП), що забезпечує як відбір тепла з мережі, так і повернення надлишкової енергії. Стаття присвячена огляду сучасних архітектур 2Н-ІТП у контексті мереж 4ПЦТ та 5ПЦТХ. Метою є проаналізувати типові конфігурації цих теплових пунктів, виявити відмінності їх функціонування в умовах низькотемпературних мереж 4-го покоління та ультранизькотемпературних 5-го, а також окреслити технічні, регуляторні й економічні аспекти впровадження.

В огляді розглянуто основні функціональні компоненти 2Н-ІТП. Показано, що в мережах 4ПЦТ 2Н-ІТП дозволяють інтегрувати розподілені локальні джерела тепла за температур подачі ~50–70 °С. Натомість у 5ПЦТХ-системах з нейтральним рівнем температури 10–30 °С кожен тепловий пункт оснащено реверсивним тепловим насосом, здатним працювати і на опалення, і на охолодження. Це забезпечує динамічний обмін тепловою енергією («heat sharing») між споживачами. Акцентовано увагу на ключових викликах впровадження 2Н-ІТП. Зокрема, розглянуто питання гідравлічної стабільності двосторонніх потоків, необхідності оновлення нормативної бази (стандарти обліку та механізми компенсації за повернуте тепло) і економічних чинників (значні інвестиційні витрати, адаптація тарифних моделей).

**Ключові слова:** централізоване теплопостачання, двонаправлений індивідуальний тепловий пункт, відновлювані джерела енергії, тепловий просьюмер, тепловий насос, охолодження, низькотемпературне теплопостачання, скидна тепла енергія.

**Вступ.** Сектор централізованого теплопостачання в сучасних умовах стикається з рядом фундаментальних викликів, серед яких найбільш актуальними є потреба у зменшенні викидів парникових газів, підвищення енергоефективності, а також адаптація до нових джерел енергії та змін у структурі попиту. Традиційні системи, що були орієнтовані на одностороннє постачання тепла від великих котельень або теплоелектроцентралей (ТЕЦ) до споживачів, вже не відповідають новим вимогам сталого розвитку.

Сучасні підходи передбачають перехід до низькотемпературних теплових мереж нового покоління – четвертого (4 покоління ЦТ або 4ПЦТ) та п'ятого (5 покоління централізованого тепло- та холодопостачання або 5ПЦТХ), які здатні інтегрувати значні частки відновлюваних джерел енергії та джерел скидного тепла. Відповідно до цієї парадигми, зростає роль децентралізованих елементів, зокрема кінцевих користувачів, які не лише споживають тепло, але й можуть його генерувати та повертати у мережу. Таких користувачів прийнято називати «тепловими просьюмерами» – аналогічно до поняття у сфері електроенергетики.

Ключовим інфраструктурним елементом для реалізації двосторонньої взаємодії між мережею та споживачем стає двонаправлений індивідуальний тепловий пункт – 2Н-ІТП. На відміну від класичних ІТП, які забезпечують лише прийом теплової енергії від централізованого джерела, 2Н-ІТП дозволяє також передавати надлишкове тепло назад у систему ЦТ. Це відкриває можливості для оптимізації теплового балансу в межах мікрорайонів, зменшення пікового навантаження на базові джерела, підвищення коефіцієнта використання локальних ВДЕ та створення більш гнучкої й стійкої інфраструктури.

Таким чином, 2Н-ІТП виступає не лише вузлом приєднання до мережі, але й активним компонентом інтелектуальної системи теплопостачання, що відіграє важливу роль у трансформації класичних мереж у багатовекторні енергообмінні платформи, характерні для 4ПЦТ та 5ПЦТХ.

**Матеріали та методи.** Дослідження виконано з використанням методів системного аналізу, структурно-функціонального порівняння та критичного огляду сучасної наукової літератури. Аналіз здійснено на основі технічної документації провідних виробників теплових пунктів, нормативних актів ЄС і України, а також публікацій, присвячених розвитку мереж 4ПЦТ/5ПЦТХ та концепції теплових просьюмерів.

**Метою роботи** є узагальнення та систематизація сучасних архітектур 2Н-ІТП, що застосовуються в системах централізованого теплопостачання четвертого та п'ятого поколінь. У центрі уваги — аналіз функціональних можливостей таких ІТП щодо забезпечення двостороннього теплообміну між споживачем і тепловою мережею, включно з режимами рекуперації надлишкового тепла, інтеграції ВДЕ та акумуляції теплоти. Дослідження також спрямоване на оцінку потенціалу 2Н-ІТП як ключових елементів декарбонізованих і гнучких тепломреж майбутнього, що здатні адаптуватися до динамічних енергетичних сценаріїв, зменшувати залежність від викопного палива та підвищувати ефективність використання локальних джерел теплової енергії.

**Виклад основного матеріалу.** У статті систематизовано сучасні архітектурні рішення 2Н-ІТП, деталізовано декілька принципів схем та їх ключові функціональні елементи. Проведено класифікацію за типом джерел тепла (централізоване, відновлюване, скидне) та способами управління потоками енергії. Особливу увагу приділено технічним можливостям 2Н-ІТП щодо реалізації режимів рекуперації надлишкового тепла, акумуляції, інтеграції з низькопотенційними джерелами тепла і тепловими насосами. Розглянуто їх роль у підвищенні гнучкості тепломреж, оптимізації локального теплового балансу та зменшенні вуглецевого сліду.

**2. Еволюція теплових мереж від 1ПЦТ до 5ПЦТХ.** Концепція «поколінь» теплових мереж відображає поступовий розвиток систем ЦТ — від застарілих технологій з великими втратами до сучасних низькотемпературних і гнучких мереж з активною участю споживачів [1].

1ПЦТ (перше покоління) — ранні системи ЦТ з подачею пари при температурі до 200 °С. Теплоносій транспортувався через бетонні канали без теплоізоляції. Ці системи характеризувалися високими тепловтратами і відсутністю ІТП у сучасному розумінні.

2ПЦТ (друге покоління) — перехід на високотемпературні водяні системи під тиском (>100 °С). Виробництво тепла було на основі викопного палива, а основними джерелами були котельні та ТЕЦ. Хоча і з'являються перші ІТП, а теплові мережі мають теплову ізоляцію, все ще зберігаються високі теплові втрати та обмежена гнучкість у споживанні.

3ПЦТ (третє покоління) — середньотемпературні теплові мережі з температурою подачі близько 90–100 °С, впровадження попередньо ізольованих труб, автоматизованих ІТП і високоефективних ТЕЦ. Широке застосування знаходять системи акумуляції тепла. Незважаючи на вдосконалення технологій, системи 3ПЦТ залишаються здебільшого орієнтованими на використання традиційних джерел та традиційних зав'язків між споживачами.

4ПЦТ (четверте покоління) — середньо- та низькотемпературні теплові мережі (НТЦТ), які працюють на рівні температур 50–70 °С. Основними рисами є зменшення тепловтрат, активна інтеграція ВДЕ (сонячна теплова енергія, геотермальна енергія тощо), а також утилізація низькопотенційного тепла від промисловості, супермаркетів чи центрів обробки даних [2, 3]. Вперше з'являється концепція активної участі споживачів у виробництві тепла — теплові «просюмери» (від англ. producer + consumer), які можуть передавати надлишок теплової енергії в мережу ЦТ.

5ПЦТХ (п'яте покоління) — інноваційні двонаправлені системи тепло- та холодопостачання, що працюють на ультранизьких температурах - 10–30 °С. Основними характеристиками є можливість одночасного забезпечення опалення та охолодження через «нейтральну» двотрубну мережу, використання реверсивних теплових насосів на рівні кожної будівлі, а також реалізація повноцінної децентралізованої архітектури з тепловим обміном в обох напрямках [4]. У 5ПЦТХ споживачі стають повноцінними учасниками енергетичного обміну, а системи керування передбачають облік і стимулювання їх внеску в тепловий баланс [5, 6].

Таким чином, еволюція від 1ПЦТ до 5ПЦТХ — це шлях від централізованих, високотемпературних і однонаправлених систем до децентралізованих, низькотемпературних і двонаправлених систем із активною участю споживачів. Особливий науковий та практичний інтерес становлять четверте та п'яте покоління, оскільки вони забезпечують найвищий рівень енергоефективності, декарбонізації та інтеграції ВДЕ.

**3. Сучасні архітектури 2Н-ІТП: компоненти та функціональність.** 2Н-ІТП – це індивідуальний тепловий пункт, сконструйований так, щоб працювати в режимі як споживання тепла з мережі, так і повернення надлишкового тепла в мережу. Архітектура таких ІТП зазнає змін у порівнянні зі звичайними однонаправленими схемами. Основні компоненти сучасних 2Н-ІТП включають:

*Теплообмінники.* В стандартних 3-4ПЦТ системах ІТП найчастіше містить пластинчастий теплообмінник для гідравлічного розділення мережевої води і внутрішнього контуру систем опалення/внутрішнього теплопостачання будівлі. У 5ПЦТХ мережах, де температура низька, можливе як пряме підключення теплового насоса до мережі, так і через проміжний теплообмінник (для запобігання змішуванню різних теплоносіїв чи забруднень). Теплообмінники також застосовуються для режиму прямого охолодження: якщо температура мережевої води достатньо низька, охолодження приміщень може здійснюватися без ввімкнення компресора теплового насоса – шляхом передачі холоду через теплообмінник ("free cooling") [7].

*Джерела тепла.* У 2Н-ІТП, що працюють у мережах 4ПЦТ, основним джерелом теплової енергії залишається класична система ЦТ. Водночас, до складу 2Н-ІТП можуть інтегруватися локальні ВДЕ (сонячні колектори, теплові насоси тощо) та джерела скидного тепла, такі як вентиляційні установки комерційних будівель та закладів охорони здоров'я, холодильне обладнання супермаркетів, установки центрів обробки даних тощо.

У системах 5ПЦТХ ключовим елементом 2Н-ІТП є тепловий насос вода/вода реверсивного типу. Такий тепловий насос працює на основі мережевої води з ультранизькою температурою як на

джерелі низькопотенційного тепла. В режимі опалення тепловий насос відбирає тепло з теплоносія мережі ЦТ (охолоджуючи його) і піднімає температуру для подачі в систему опалення будівлі або для підігріву в системах гарячого водопостачання (ГВП). У режимі охолодження той самий агрегат працює як чилер: відбирає тепло з внутрішнього контуру будівлі (охолоджуючи приміщення) і віддає це тепло в мережу (нагріваючи мережеву воду) з подальшою можливістю сезонного акумулювання на рівні системи ЦТ. У деяких випадках в 2Н-ІТП можуть бути окремі теплові насоси для роботи системи ГВП (оскільки ГВП потребує вищої температури,  $\sim 60^{\circ}\text{C}$ ) та/або окремі чилери для кондиціонування, особливо в комерційних будівлях [8]. Проте загальна тенденція – використання єдиного реверсивного теплового насоса (“hybrid substation”), здатного покривати обидва режими.

*Циркуляційні насоси та арматура.* Ефективна робота 2Н-ІТП вимагає чітко спроектованої насосної системи, здатної забезпечити надійний гідравлічний режим як у внутрішніх контурах споживача, так і в мережі. У типовій конфігурації передбачаються циркуляційні насоси в контурах опалення, гарячого водопостачання будівлі, локального джерела, для завантаження бака-акумулятора та в частині рекуперації тепла. У системах 5ПЦТХ використовується децентралізоване управління витратами: кожен 2Н-ІТП оснащується насосом, який забезпечує потік теплоносія відповідно до поточного попиту на опалення або охолодження. Такі насоси дозволяють реалізувати як споживання, так і рекуперацію теплоти в мережу в залежності від теплового балансу будівлі [9].

Запірно-регулювальна арматура, зокрема зворотні клапани, відіграє критичну роль у забезпеченні правильного напрямку потоків і запобіганні гідравлічним конфліктам у системі. Використання автоматизованих регуляторів тиску/витрати дозволяє адаптувати гідравлічний режим до змін у мережі та сприяє стабільній роботі всієї інфраструктури.

*Баки-акумулятори.* У сучасних 2Н-ІТП важливу роль відіграють баки-акумулятори тепла — як для ГВП, так і для опалення чи охолодження. Їх застосування дозволяє згладжувати теплове навантаження, уникати пікових споживань електроенергії та підвищувати стабільність роботи ВДЕ. Особливо актуально це для 5ПЦТХ-систем, де баки-акумулятори глибоко інтегровані в архітектуру 2Н-ІТП. Згідно з [10], завдяки застосуванню оптимізованого керування на основі штучного інтелекту (ШІ), до 14 % споживання електроенергії для підготовки гарячої води може бути зміщено з пікових на нічні години, зменшуючи навантаження на електромережу. Крім того, акумулювання дозволяє забезпечити комфорт під час пікових навантажень, уникати надмірної кількості вмикань/вимикань теплового насоса та краще використовувати локальну ВДЕ-генерацію (наприклад, електричні сонячні станції), акумулюючи надлишки у вигляді теплової енергії.

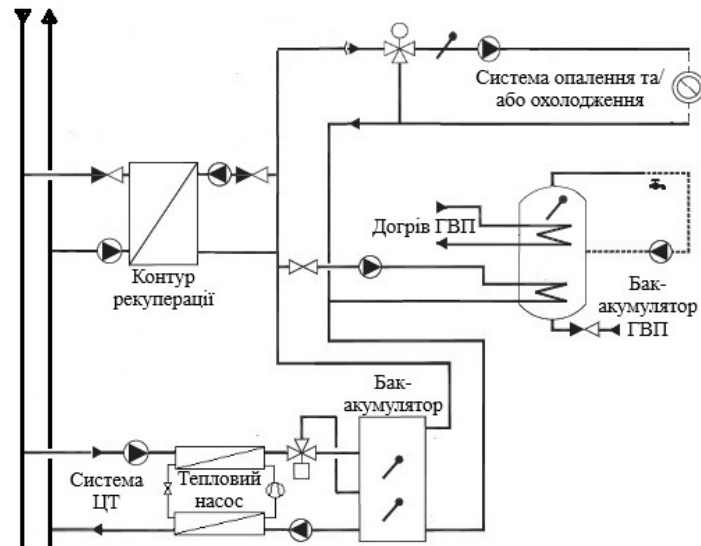
*Автоматика та засоби обліку.* 2Н-ІТП потребують високорозвиненої системи автоматики, здатної не лише перемикає режими роботи (опалення ↔ охолодження), але й динамічно регулювати параметри теплоносія відповідно до поточних потреб будівлі та стану теплової мережі. У системах 4ПЦТ функціональність автоматики зазвичай зосереджена на підтримці заданої температури подачі в систему опалення та/або ГВП відповідно до температурного графіка, а також на обмеженні температури зворотного потоку для підвищення ефективності мережі.

У системах 5ПЦТХ функціональність автоматики розширюється завдяки впровадженню ШІ, зокрема методів предиктивного керування (Model Predictive Control (MPC)), що може бути частиною ШІ, які забезпечують оптимізацію роботи теплових насосів в реальному часі з урахуванням тарифів на електроенергію, потреб користувачів, температур ґрунту та інших параметрів [10].

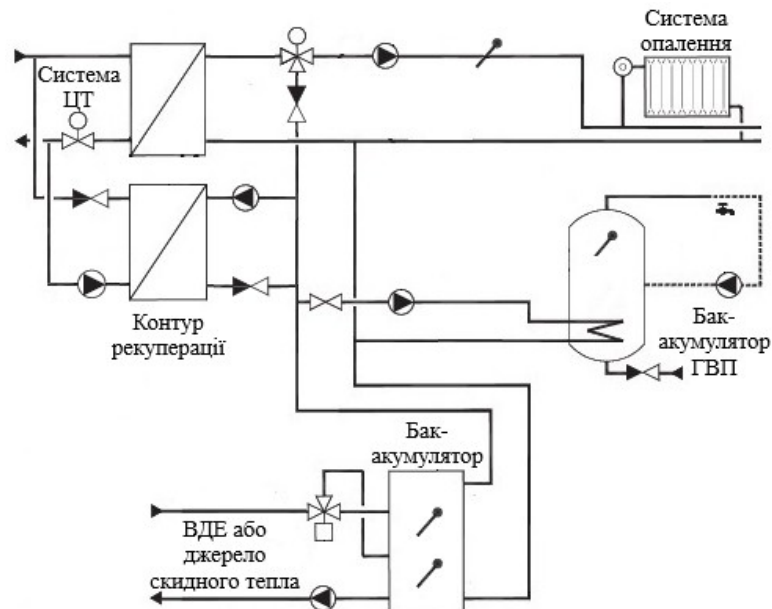
Крім управління, надзвичайно важливою є система енергетичного обліку. У традиційних ІТП теплолічильники вимірюють лише односторонній потік енергії (тепло з мережі до споживача) на основі витрати та  $\Delta T$ . Натомість у двонаправлених мережах необхідні або двонаправлені теплолічильники, або дві незалежні системи обліку – для отриманого та переданого тепла. Це є передумовою для запровадження справедливої тарифікації і компенсації споживачам за повернуту в мережу енергію. Водночас, відсутність уніфікованих стандартів та алгоритмів обліку і тарифів для двонаправленого теплопотоку є бар’єром для масштабного впровадження таких систем.

**3.1 Функціональність 2Н-ІТП.** Ключовою особливістю 2Н-ІТП є можливість не лише споживання теплової енергії з системи ЦТ, але й повернення надлишкового тепла назад у систему.

Наприклад, супермаркет чи центр обробки даних, що охолоджує обладнання, генерує низькопотенційне тепло, яке може бути використано іншими споживачами. Таким чином мережа здійснює «heat sharing» між користувачами: тепло, що є побічним продуктом для одного, стає ресурсом для іншого. 2Н-ІТП при цьому виконує роль інтелектуального вузла обміну енергією.



**Рисунок 1** – 2Н-ІТП в ультранизькотемпературних системах 5-го покоління  
**Figure 1** – Bidirectional heating substation in ultra-low temperature systems 5GDHC



**Рисунок 2** – 2Н-ІТП в середньо та низькотемпературних системах 4-го покоління  
**Figure 2** – Bidirectional heating substation in ultra-low temperature systems 5GDHC

У системах 5ПЦТ потоки в тепловій мережі є динамічними – напрям циркуляції залежить від балансу попиту на тепло або холод у різних частинах мережі. Якщо переважає потреба в опаленні, тепло рухається від джерел до споживачів, а за наявності попиту на охолодження – в протилежному напрямку. 2Н-ІТП має адаптуватися до цих змін, забезпечуючи стабільну роботу локальних систем. Візуальне представлення прикладу архітектури 2Н-ІТП у мережах 5ПЦТ представлено на Рис 1.

У контексті архітектури 4ПЦТ, 2Н-ІТП зазвичай взаємодіє як із класичною мережею ЦТ, так і з локальними джерелами тепла — сонячними колекторами, тепловими насосами, геотермальними зондами, а також джерелами скидного тепла як усередині обслуговуваних будівель, так і поза ними. Візуальне представлення прикладу архітектури 2Н-ІТП у мережах 4ПЦТ представлено на Рис 2.

У мережах 5ПЦТХ майже кожен 2Н-ІТП містить реверсивний тепловий насос, який забезпечує підвищення температури до потрібного рівня для будівлі або для передачі в мережу. Це дозволяє ефективно інтегрувати різноманітні джерела низькотемпературного тепла – геотермальне тепло, скидне тепло стічних, шахтних вод тощо. Дослідження відзначають, що поєднання 5ПЦТХ з технологіями неглибоких геотермальних систем є взаємовигідним: ґрунт слугує сезонним акумулятором, підвищуючи гнучкість та ефективність системи ЦТ [11].

П'яте покоління теплових мереж ще перебуває на стадії раннього впровадження: наразі по Європі діє відносно небагато таких систем, переважно демонстраційних або пілотних. В оглядовому дослідженні Buffa та ін. [10] ідентифіковано 40 реалізованих мереж 5ПЦТХ у Європі; більшість з них зосереджені в Німеччині та Швейцарії (по 15 систем), а також декілька в Італії [12]. Це підтверджує, що країни Центральної Європи є піонерами у впровадженні 5ПЦТХ, часто використовуючи наявний потенціал низькопотенційного тепла (геотермальні води, промислове тепло, тощо).

У контексті теплових мереж 4-го покоління 2Н-ІТП відіграють дедалі важливішу роль. Вони працюють у низькотемпературному режимі (подача ~50–70 °С) та забезпечують як споживання тепла з системи ЦТ, так і передачу надлишків в неї. У таких ІТП передбачено можливість інтеграції різних локальних ВДЕ, а також джерел скидного тепла (вентиляційних систем, холодильного обладнання тощо). Це дозволяє забезпечити децентралізоване виробництво тепла та підвищити загальну стійкість системи в періоди пікового навантаження на базові джерела.

**4. Просьюмери та пов'язані бізнес-моделі.** Перехід до тепломереж 4ПЦТ та 5ПЦТХ поколінь супроводжується зміною ролі споживачів теплової енергії. Замість пасивної участі, користувачі перетворюються на теплових просьюмерів — учасників, які одночасно споживають і генерують тепло [13]. Це стало можливим завдяки розвитку технологій 2Н-ІТП, що можуть функціонувати в режимі як споживання, так і повернення тепла в мережу. У системах 4ПЦТ можливе підключення розподілених джерел тепла (наприклад, сонячних колекторів або скидного тепла промислових процесів), проте з певними обмеженнями щодо температурного рівня. У 5ПЦТХ-системах, які працюють на основі «теплового інтернету», кожна будівля може динамічно змінювати режим — подавати або відбирати тепло відповідно до поточних потреб і локального теплового балансу [12].

Це створює передумови для розвитку нових бізнес-моделей. Замість класичної централізованої схеми з єдиним постачальником з'являються платформи для двостороннього обміну теплом, як-от Open District Heating у Швеції. У такій моделі надлишкове тепло (наприклад, від центрів обробки даних, торгових центрів чи промислових процесів) купується оператором мережі або іншими споживачами. Система взаєморозрахунків базується на даних з теплотічильників, що вимірюють кількість енергії в одно- або двонаправленому режимі [14].

Інтеграція просьюмерів вимагає не лише технічного оновлення мереж (інтелектуальне керування, накопичувачі енергії, автоматизовані ІТП), а й реформування тарифної та нормативної бази. Потрібні контракти, що враховують генерацію, споживання, оплату за резервування потужностей та транспортування тепла. Регулювання має охоплювати динамічне ціноутворення, справедливий розподіл витрат і інфраструктурні платежі.

З іншого боку, розвиток теплових просьюмерів відкриває численні переваги: зменшення втрат енергії, скорочення викидів CO<sub>2</sub>, залучення ВДЕ, підвищення стійкості та децентралізація тепlopостачання. У європейських країнах розвиток теплових просьюмерів підтримується як на рівні

технологій, так і політик. ЄС фінансує низку проєктів зі створення низькотемпературних 4ПЦТ/5ПЦХ-систем, зокрема із залученням скидного тепла центрів обробки даних та торговельних центрів. Європейське законодавство поступово адаптується: переглянута Директива щодо відновлюваної енергії (RED II/III) вводить поняття “спільнот відновлюваної енергетики”, що дозволяє громадянам об’єднуватися для спільного виробництва і споживання енергії, включно з теплом. Для України концепція теплових просюмерів також є перспективною. Вітчизняна система тепlopостачання наразі переживає модернізацію: впроваджуються ІТП, погодозалежне регулювання, теплові лічильники тощо. Наступним кроком може стати апробація 4ПЦТ-підходів у нових районах забудови або модернізованих мережах – із нижчими температурними графіками та підключенням локальних джерел (наприклад, котелень на біомасі, теплових насосів на стічних водах, сонячних колекторів на дахах будівель тощо). У довгостроковій перспективі, із розвитком децентралізованої генерації і накопичення енергії, можливе формування енергетичних кооперативів на рівні міст чи громад, де споживачі спільно володітимуть інфраструктурою і обмінюватимуться як електро-, так і тепловою енергією. Запозичення європейського досвіду та адаптація регуляторних норм під просюмерську модель допоможе Україні підвищити надійність і ефективність тепlopостачання, а також інтегруватися в загальноєвропейський тренд зеленої енергетики.

### **5. Проблеми та виклики впровадження 2Н-ІТП.**

*Гідравлічні та технічні обмеження.* Впровадження 2Н-ІТП у мережах 4-го і 5-го покоління супроводжується низкою гідравлічних та технічних викликів, незалежно від температурного рівня системи. Основним технічним викликом є реакція на динамічну зміну гідравлічних умов — напрямку потоку, тиску або витрати. Це вимагає застосування адаптивних засобів керування: інтелектуальних регуляторів тиску, регуляторів витрати, а також циркуляційних насосів з можливістю автоматичної зміни обертів залежно від температури або перепаду тиску. Таким чином, розвиток 2Н-ІТП у складі 4ПЦТ/5ПЦХ потребує не лише оновлення теплових пунктів та насосного обладнання, а й впровадження алгоритмів адаптивного регулювання. Ці аспекти вимагають подальших досліджень щодо оптимальної топології мереж, стабілізації тиску в режимах двостороннього обміну, а також координації децентралізованих вузлів на рівні автоматизованого керування.

*Проблеми автоматизації та керування.* 2Н-ІТП суттєво ускладнюють завдання управління тепловими потоками через наявність множинних активних вузлів, здатних змінювати режим роботи у реальному часі. У децентралізованих теплових мережах кожен просюмер може одночасно виступати як споживач, так і джерело теплової енергії, що зумовлює постійно змінні режими роботи на рівні ІТП. За таких умов традиційні принципи локального або централізованого управління стають недостатніми для забезпечення гідравлічної стабільності та ефективного енергетичного балансу. Системи з 2Н-ІТП потребують нових, більш комплексних підходів до моніторингу, управління та оптимізації теплових потоків — як на рівні окремих будівель, так і в масштабах розподільчої мережі. Йдеться, зокрема, про розробку наскрізних стратегій керування, здатних адаптуватися до змінних параметрів споживання, джерел тепла, погодних умов і цінових сигналів.

Для ефективного балансування попиту та пропозиції тепла необхідні інтелектуальні системи керування, що базуються на прогностичних алгоритмах або методах ШІ. Такі підходи дозволяють оптимізувати роботу теплових насосів, акумуляторів і контрольно-регулюючої арматури з урахуванням погодних умов, тарифних сигналів та стану електромережі.

З огляду на складність мережі, особливої важливості набувають рішення з мінімальними вимогами до ручного втручання (Plug&Play): обладнання повинно самостійно адаптуватися до локальних умов, зокрема витрати, перепаду тиску, температурного графіку. Це знижує потребу в індивідуальному налаштуванні при введенні ІТП в експлуатацію та підвищує надійність системи загалом.

Однак реалізація таких технологій вимагає високого рівня цифровізації теплової інфраструктури: необхідні датчики, лічильники з функцією передачі даних у реальному часі, протоколи зв’язку між вузлами та захищена ІТ-інфраструктура [15]. Недостатній розвиток цих

компонентів наразі залишається одним із ключових бар'єрів на шляху широкого впровадження 2Н-ІТП.

*Облік та компенсація енергії.* Запровадження 2Н-ІТП вимагає переосмислення системи обліку енергії та взаєморозрахунків між учасниками. Стандартні теплолічильники переважно орієнтовані на фіксацію одностороннього потоку — від джерела до споживача — і не пристосовані до реєстрації зворотної передачі енергії від споживача до мережі. У зв'язку з цим актуальним є впровадження спеціалізованих приладів або програмних алгоритмів, здатних автоматично обробляти тепловий баланс у двох напрямках. Одним із потенційних рішень виступає концепція нетто-обліку: споживачеві виставляється рахунок на основі різниці між отриманою і повернутою енергією. Такий підхід може бути доповнений системою диференційованих тарифів, які враховують напрям потоку, якість теплоносія та часову структуру навантаження. Однак відсутність національних методичних документів та регламентів щодо алгоритмів двостороннього обліку і тарифікації досі є значним бар'єром для реалізації повноцінних просьюмерських моделей у більшості країн Європи та, зокрема, в Україні.

*Регуляторні бар'єри.* Розгортання 2Н-ІТП стикається зі значними правовими та нормативними обмеженнями. Поточне законодавче середовище в більшості країн, зокрема і в Україні, побудоване навколо традиційної централізованої моделі теплопостачання, де споживач виступає пасивною стороною, а оператор мережі — єдиним виробником і постачальником теплової енергії. Відсутність законодавчо закріпленої ролі просьюмера — активного учасника ринку, що має право не лише споживати, а й передавати надлишкове тепло в мережу — створює невизначеність для потенційних учасників таких схем.

Особливо актуальними є виклики, пов'язані з ліцензуванням малих виробників тепла, стандартизацією вимог до якості переданого теплоносія, а також відсутністю механізмів компенсації за передане тепло. Дотепер бракує типових договорів для інтеграції користувачів у мережу в якості постачальників тепла, а національні тарифні політики не передбачають ставок для енергії, що повертається в систему. Це значно ускладнює економічну привабливість впровадження 2Н-ІТП, навіть за наявності технічних можливостей.

У країнах ЄС, попри загальну орієнтацію на децентралізовану енергетику, нормативне забезпечення продажу тепла від споживачів досі перебуває на етапі формування. Зокрема, необхідний перегляд правил балансування, обліку і взаємодії між електро- та тепловими ринками, оскільки сучасні системи часто інтегрують генерацію, що споживає електричну енергію (наприклад, теплові насоси), що впливають на обидва сектори одночасно.

З огляду на це, розробка правових основ для залучення просьюмерів до ринку тепла, створення стандартів обліку та компенсації, а також адаптація тарифної моделі — є критично необхідними умовами для масштабного впровадження двонаправлених теплових систем як в Україні, так і в європейському контексті.

*Економічні та соціальні аспекти впровадження 2Н-ІТП.* Впровадження 2Н-ІТП вимагає значних капіталовкладень як на рівні будівельної інфраструктури, так і системного управління. До ключових витрат належить модернізація ІТП, інтеграція локального джерела (додаткові теплообмінники, елементи регулювання, датчики тощо), впровадження систем накопичення енергії, заміна арматури, а також підвищення енергоефективності будівель. Незважаючи на довгострокові переваги, такі як зменшення витрат на енергію, підвищення гнучкості та скорочення викидів, високі початкові витрати залишаються бар'єром для масового впровадження.

У країнах з обмеженим фінансуванням, зокрема в Україні, обґрунтованим підходом є поступова модернізація: початкова адаптація існуючих мереж шляхом встановлення сучасних ІТП з погодозалежним регулюванням та обліком, далі — інтеграція локальних джерел тепла (ВДЕ, джерел скидного тепла тощо) у новобудовах і оновлених мікрорайонах [16]. Такий підхід дозволяє досягати поступового зменшення температурного графіка та зниження навантаження на базові джерела без різкого зростання капітальних витрат.

Соціальні фактори мають не менш важливе значення. У багатьох споживачів відсутнє чітке розуміння переваг двонаправленої взаємодії з тепловою мережею, а ризик невиправданих витрат на

модернізацію може викликати скепсис. Довіра до нових технологій, доступ до прозорої інформації та наявність економічної мотивації визначають рівень участі споживачів у впровадженні нових моделей. Успішне впровадження інноваційних рішень у сфері теплопостачання значною мірою залежить від рівня поінформованості споживачів, демонстрації практичних переваг технологій, а також наявності економічних стимулів, таких як гранти, знижки або податкові пільги.

Таким чином, економічна ефективність 2Н-ІТП залежить не лише від технічного вибору, а й від здатності зацікавлених сторін адаптуватися до нових умов – як у плані фінансування, так і соціального сприйняття.

**Висновки.** 2Н-ІТП є ключовим елементом переходу централізованого теплопостачання до стійкої та гнучкої моделі. Вони перетворюють традиційну односторонню мережу на багатовекторну систему обміну енергією, у якій кінцеві споживачі виступають активними учасниками. Це відкриває широкі можливості для інтеграції відновлюваних джерел та скидного тепла на рівні будівель та підприємств, підвищення енергоефективності та зниження викидів. Наявність 2Н-ІТП є передумовою розвитку просьюмерських відносин: надлишкове тепло може передаватися іншим споживачам або продаватися в мережу, що підвищує гнучкість і надійність теплопостачання.

Водночас для масового впровадження 2Н-ІТП в Україні та Європі необхідно усунути низку технічних, регуляторних та економічних бар'єрів. Насамперед актуальним є оновлення нормативно-правової бази для двостороннього обміну теплом – запровадження стандартів обліку та механізмів компенсації за повернуту енергію, а також вирішення економічних питань, зокрема зниження високих початкових інвестиційних витрат і розробка ефективних тарифних стимулів. Подолання цих перешкод вимагатиме скоординованих зусиль влади, бізнесу та громади, проте відкриє шлях до широкого застосування 2Н-ІТП. У результаті двонаправлені теплові пункти зможуть повною мірою реалізувати свій потенціал у декарбонізації теплопостачання, розвитку просьюмерських моделей і підвищенні енергетичної ефективності та безпеки як в Україні, так і по всій Європі.

#### Перелік посилань

1. Ігламаздин, П. М., Баранчук, К. О., & Приймак, О. В. (2021). Нові підходи до організації централізованого теплопостачання. *Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання*, 39, 38-46.
2. Lund, H., Werner, S., Wiltshire, R., Svendsen, S., Thorsen, J. E., Hvelplund, F., & Mathiesen, B. V. (2014). 4th Generation District Heating (4GDH): Integrating smart thermal grids into future sustainable energy systems. *energy*, 68, 1-11.
3. Sorknaes, P., Østergaard, P. A., Thellufsen, J. Z., Lund, H., Nielsen, S., Djørup, S., & Sperling, K. (2020). The benefits of 4th generation district heating in a 100% renewable energy system. *Energy*, 213, 119030.
4. Buffa, S., Cozzini, M., D'antoni, M., Baratieri, M., & Fedrizzi, R. (2019). 5th generation district heating and cooling systems: A review of existing cases in Europe. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 104, 504-522.
5. Revesz, A., Jones, P., Dunham, C., Davies, G., Marques, C., Matabuena, R., ... & Maidment, G. (2020). Developing novel 5th generation district energy networks. *Energy*, 201, 117389.
6. Wirtz, M., Neumaier, L., Remmen, P., & Müller, D. (2021). Temperature control in 5th generation district heating and cooling networks: An MILP-based operation optimization. *Applied Energy*, 288, 116608.
7. Chicherin, S. (2023). Amount of heat available from a prosumer of a 5th generation district heating and cooling (5GDHC) system: Case study of a data center. *Journal of Building Engineering*, 76, 107138.
8. Maccarini, A., Sotnikov, A., Sommer, T., Wetter, M., Sulzer, M., & Afshari, A. (2023). Influence of building heat distribution temperatures on the energy performance and sizing of 5th generation district heating and cooling networks. *Energy*, 275, 127457.
9. Mans, M., Blacha, T., Schreiber, T., & Müller, D. (2022). Development and Application of an Open-Source Framework for Automated Thermal Network Generation and Simulations in Modelica. *Energies*, 15(12), 4372.

10. Buffa, S., Soppelsa, A., Pipiciello, M., Henze, G., & Fedrizzi, R. (2020). Fifth-generation district heating and cooling substations: Demand response with artificial neural network-based model predictive control. *Energies*, 13(17), 4339.
11. Meibodi, S. S., & Loveridge, F. (2022). The future role of energy geostructures in fifth generation district heating and cooling networks. *Energy*, 240, 122481.
12. García-Céspedes, J., Herms, I., Arnó, G., & De Felipe, J. J. (2022). Fifth-generation district heating and cooling networks based on shallow geothermal energy: a review and possible solutions for Mediterranean Europe. *Energies*, 16(1), 147.
13. Pakere, I., Kacare, M., Murauskaitė, L., & Huang, P. (2023). Comparison of Suitable Business Models for the 5th Generation District Heating System Implementation through Game Theory Approach. *Environmental and Climate Technologies*, 27(1), 1-15.
14. Lygnerud, K. (2019). Business model changes in district heating: The impact of the technology shift from the third to the fourth generation. *Energies*, 12(9), 1778.
15. Lindhe, J., Javed, S., Johansson, D., & Bagge, H. (2022). A review of the current status and development of 5GDHC and characterization of a novel shared energy system. *Science and Technology for the Built Environment*, 28(5), 595-609.
16. Polyvianchuk, A., Semenenko, R., Kapustenko, P., Klemeš, J. J., & Arsenyeva, O. (2023). The efficiency of innovative technologies for transition to 4th generation of district heating systems in Ukraine. *Energy*, 263, 125876.

#### **OVERVIEW OF MODERN ARCHITECTURES OF BIDIRECTIONAL HEATING SUBSTATION IN DISTRICT HEATING SYSTEMS**

**Kyrylo Baranchuk O.**, Postgraduate student, Department of Thermal Engineering, National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine. Deputy Director for Scientific and Technical Activities, Danfoss Ukraine LLC, e-mail: [kyrylo.baranchuk@danfoss.com](mailto:kyrylo.baranchuk@danfoss.com), tel.+380504125633, <https://orcid.org/0000-0003-4491-9396>.

**Chechuga Oleksandr S.**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Transport Construction and Property Management, National Transport University, Kyiv, Ukraine, e-mail: [chechuga77@gmail.com](mailto:chechuga77@gmail.com), тел. +380662019442. <https://orcid.org/0000-0003-1643-6354>

**Summary.** Modern systems of district heating of the fourth (4GDH) and district heating and cooling of the fifth (5GDHC) generations increasingly integrate renewable energy sources (RES) and waste heat, while changing the role of consumers to active “thermal prosumers”. The key element of such two-way interaction between the network and the building is a bidirectional heating substation, which provides both heat withdrawal from the network and the return of excess energy. The article is devoted to a review of modern architectures of bidirectional heating substation in the context of 4GDH and 5GDHC networks. The aim is to analyze typical configurations of these heating substation, identify differences in their functioning in conditions of low-temperature networks of the 4th generation and ultra low-temperature networks of the 5th, as well as outline technical, regulatory and economic aspects of implementation. The review considers the main functional components of bidirectional heating substation. It is shown that in 4GDH networks, bidirectional heating substations allow integrating distributed local heat sources at supply temperatures of ~50–70°C. In contrast, in 5GDHC systems with a "neutral" temperature level of 10–30°C, each heat point is equipped with a reversible heat pump capable of operating both for heating and cooling. This ensures dynamic exchange of thermal energy (“heat sharing”) between consumers. The focus is on the key challenges of implementing bidirectional heating substation. In particular, the issues of hydraulic stability of two-way flows, the need to update the regulatory framework (accounting standards and compensation mechanisms for returned heat) and economic factors (significant investment costs, adaptation of tariff models) are considered.

**Keywords:** district heating, bidirectional heating substation, renewable energy sources, thermal prosumer, heat pump, cooling, low-temperature district heating, waste heat energy.

References

1. P. Glamazdin, K. Baranchuk, O. Priymak (2021). New approaches to the organization of district heating. *Ventilation Illumination and Heat Gas Supply*, 39, 38-46.
2. Lund, H., Werner, S., Wiltshire, R., Svendsen, S., Thorsen, J. E., Hvelplund, F., & Mathiesen, B. V. (2014). 4th Generation District Heating (4GDH): Integrating smart thermal grids into future sustainable energy systems. *energy*, 68, 1-11.
3. Sorknaes, P., Østergaard, P. A., Thellufsen, J. Z., Lund, H., Nielsen, S., Djørup, S., & Sperling, K. (2020). The benefits of 4th generation district heating in a 100% renewable energy system. *Energy*, 213, 119030.
4. Buffa, S., Cozzini, M., D'antoni, M., Baratieri, M., & Fedrizzi, R. (2019). 5th generation district heating and cooling systems: A review of existing cases in Europe. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 104, 504-522.
5. Revesz, A., Jones, P., Dunham, C., Davies, G., Marques, C., Matabuena, R., ... & Maidment, G. (2020). Developing novel 5th generation district energy networks. *Energy*, 201, 117389.
6. Wirtz, M., Neumaier, L., Remmen, P., & Müller, D. (2021). Temperature control in 5th generation district heating and cooling networks: An MILP-based operation optimization. *Applied Energy*, 288, 116608.
7. Chicherin, S. (2023). Amount of heat available from a prosumer of a 5th generation district heating and cooling (5GDHC) system: Case study of a data center. *Journal of Building Engineering*, 76, 107138.
8. Maccarini, A., Sotnikov, A., Sommer, T., Wetter, M., Sulzer, M., & Afshari, A. (2023). Influence of building heat distribution temperatures on the energy performance and sizing of 5th generation district heating and cooling networks. *Energy*, 275, 127457.
9. Mans, M., Blacha, T., Schreiber, T., & Müller, D. (2022). Development and Application of an Open-Source Framework for Automated Thermal Network Generation and Simulations in Modelica. *Energies*, 15(12), 4372.
10. Buffa, S., Soppelsa, A., Pipiciello, M., Henze, G., & Fedrizzi, R. (2020). Fifth-generation district heating and cooling substations: Demand response with artificial neural network-based model predictive control. *Energies*, 13(17), 4339.
11. Meibodi, S. S., & Loveridge, F. (2022). The future role of energy geostructures in fifth generation district heating and cooling networks. *Energy*, 240, 122481.
12. García-Céspedes, J., Herms, I., Arnó, G., & De Felipe, J. J. (2022). Fifth-generation district heating and cooling networks based on shallow geothermal energy: a review and possible solutions for Mediterranean Europe. *Energies*, 16(1), 147.
13. Pakere, I., Kacare, M., Murauskaite, L., & Huang, P. (2023). Comparison of Suitable Business Models for the 5th Generation District Heating System Implementation through Game Theory Approach. *Environmental and Climate Technologies*, 27(1), 1-15.
14. Lygnerud, K. (2019). Business model changes in district heating: The impact of the technology shift from the third to the fourth generation. *Energies*, 12(9), 1778.
15. Lindhe, J., Javed, S., Johansson, D., & Bagge, H. (2022). A review of the current status and development of 5GDHC and characterization of a novel shared energy system. *Science and Technology for the Built Environment*, 28(5), 595-609.
16. Polyvianchuk, A., Semenenko, R., Kapustenko, P., Klemeš, J. J., & Arsenyeva, O. (2023). The efficiency of innovative technologies for transition to 4th generation of district heating systems in Ukraine. *Energy*, 263, 125876.
17. Погосов, О. Г., Чепурна, Н. В., Пасічник, П. О., Кулінко, Є. О., & Дорошенко, А. А. (2023). Сучасні системи тепло-та паропостачання промислових підприємств при застосуванні глибокої утилізації енергетичного потенціалу технологічної пари. Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання, 45, 42-51.