

КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БУДІВНИЦТВА І
АРХІТЕКТУРИ

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

БАРАНЧУК КИРИЛО ОЛЕКСІЙОВИЧ

ДИСЕРТАЦІЯ

**СИСТЕМИ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ З ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИМИ
ДВОНАПРАВЛЕНИМИ ТЕПЛОВИМИ ПУНКТАМИ**

Спеціальність: 192 – Будівництво та цивільна інженерія

Галузь знань: 19 – Архітектура та будівництво

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

_____К.О. Баранчук

Наукові керівники - **Приймак Олександр Вікторович**

доктор технічних наук, професор

Любарець Олександр Петрович

кандидат технічних наук, доцент

Київ – 2025

АНОТАЦІЯ

Баранчук К.О. Системи теплопостачання з енергоефективними двонаправленими тепловими пунктами. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 192 «Будівництво та цивільна інженерія» (19 – Архітектура та будівництво). – Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ, 2025 р.

Основний зміст дисертаційної роботи. У дисертаційній роботі досліджуються інноваційні рішення для централізованого теплопостачання на основі енергоефективних двонаправлених індивідуальних теплових пунктів (2Н-ІТП). Вступна частина підкреслює, що сучасні системи централізованого теплопостачання (ЦТ) переходять до моделей 4-го і 5-го поколінь із низькотемпературними мережами та високим вмістом відновлюваних джерел енергії (ВДЕ). Особливу актуальність набувають ІТП, які не лише отримують тепло з мережі, а й передають надлишки тепла назад у мережу. Наукова новизна роботи полягає у формулюванні наукових засад побудови та експлуатації двонаправлених теплових пунктів, розробці нових схем і алгоритмів їх роботи. Практична значущість полягає в обґрунтуванні ефективності 2Н-ІТП для зниження теплових втрат, інтеграції локальних ВДЕ та підвищення гнучкості системи ЦТ. У роботі окреслено перспективні напрями розвитку сучасних цифрових платформ для моніторингу й управління 2Н-ІТП, що сприятиме подальшій автоматизації процесів, адаптивному керуванню та прогнозуванню теплових навантажень.

Дисертація містить оригінальні науково обґрунтовані розробки: нові схеми теплових пунктів, методики моделювання й управління 2Н-ІТП, експериментальні дослідження та рекомендації для практичного впровадження. Ці результати можуть бути використані при розробці нормативних документів що регламентують функціонування та впровадження ІТП, а також для

проектування та оптимізації реальних систем ЦТ з урахуванням більш глибокої інтеграції ВДЕ.

У першому розділі подано комплексний огляд літератури з питань розвитку ЦТ і теплових пунктів. Розглядаються технології різних поколінь ЦТ: від високотемпературних систем 1–3 поколінь до сучасних концепцій 4-го (4ПЦТ) і 5-го (5ПЦТХ) поколінь з низькими температурами теплоносія.

Окрему увагу приділено архітектурам теплових пунктів різного рівня — центральних (ЦТП), розподільчих (РТП), індивідуальних (ІТП), з урахуванням їхніх функціональних можливостей, гідравлічної структури та технічного оснащення. Визначено, що більшість традиційних ІТП мають односпрямовану архітектуру, яка обмежує гнучкість взаємодії з мережею, особливо у контексті впровадження ВДЕ.

Акцентовано увагу на інтеграції теплових насосів, використанні низькопотенційного тепла і цифрових систем управління в нових поколіннях ЦТ. Аналіз літературних джерел показав, що перехід до 4ПЦТ передбачає зниження температури мереж, введення теплових акумуляторів та акцент на енергоефективності. 5-те покоління об'єднує централізовані системи теплопостачання і холодопостачання у гнучку систему з широким використанням ВДЕ.

У цьому контексті особливу увагу присвячено проблемі інтеграції ВДЕ. Наведено аналіз досліджень, що описують використання сонячних колекторів, теплових насосів та джерел скидного тепла у ЦТ. Встановлено, що для успішного впровадження ВДЕ необхідне зниження температурного рівня мереж та модернізація інфраструктури, зокрема поширення ІТП. Розглянуто європейські директиви і національне законодавство щодо енергоефективності, які стимулюють розробку низькотемпературних інтегрованих систем теплопостачання. Аналіз літератури показав, що існуючі ІТП найчастіше мають односпрямовану архітектуру і обмежені можливості інтеграції локальних джерел.

Проведений огляд викрив ключові наукові прогалини: недостатність досліджень щодо 2Н-ІТП, які здатні не лише споживати тепло, а й повернути надлишки в мережу. З цієї точки зору науковою новизною розділу є підкреслення необхідності розвитку 2Н-ІТП як інфраструктурного компонента «розумних» енергосистем майбутнього. У розділі акцентовано, що 2Н-ІТП розширюють можливості балансування локальних теплових потоків і підвищують гнучкість ЦТ, особливо при переході до 4ПЦТ.

Практичне значення цього аналізу полягає в систематизації відомих концепцій та методів модернізації ЦТ, що створює основу для подальшого впровадження енергоефективних рішень. Зокрема, виявлено, що перехід на низькотемпературний режим у поєднанні з системами цифрового моніторингу на всіх рівнях систем ЦТ значно розширює перелік доступних джерел тепла. Результати огляду можуть бути використані при оновленні навчальних і методичних матеріалів з систем ЦТ та плануванні модернізації теплових мереж, з урахуванням потреб інтеграції ВДЕ.

Другий розділ присвячений розробці принципової схеми та фізико-математичному моделюванню 2Н-ІТП. У межах розділу запропоновано нову конфігурацію 2Н-ІТП, що забезпечує гнучке керування потоками теплової енергії між системою ЦТ та локальними джерелами, зокрема тепловими насосами, сонячними колекторами й джерелами скидного тепла. Унікальною ознакою схеми є можливість двонаправленої циркуляції теплоносія з функціями рекуперації, накопичення надлишкового тепла й подальшої його передачі назад у тепломережу.

Систематизовано типові підходи до побудови двонаправлених схем із використанням буферних ємностей, змішувальних вузлів, регулювальних клапанів і циркуляційних насосів. Окрему увагу приділено алгоритмам керування пріоритетами: наприклад, коли тепла енергія подається переважно з ВДЕ, а джерело ЦТ використовується лише в пікові моменти або для балансування системи.

У другій частині розділу розроблено фізико-математичну модель теплових потоків у ключових компонентах 2Н-ІТП: теплообмінниках, буферних ємностях та гідравлічних контурах. Встановлено математичні залежності між температурними перепадами, витратами теплоносія та динамікою тепломасообміну. Введено енергетичну балансну модель теплового просьюмера, що враховує потоки теплової енергії з централізованої мережі, локальних джерел і обсяг надлишків теплової енергії, переданих до мережі. Модель дозволяє кількісно оцінити коефіцієнт трансформації (COP) теплового насоса у складі системи та його вплив на загальну енергоефективність.

Ключовою науковою новизною цього розділу є розробка нової принципової схеми 2Н-ІТП, яка подана у патентній заявці з подальшою передачею прав інтелектуальної власності на винахід.

Адаптивні алгоритми керування, розроблені на основі PI-регулятора, враховують змінну динаміку теплового навантаження, температурні коливання зовнішнього середовища та ієрархію пріоритетів джерел тепла. Такий підхід дозволяє гнучко балансувати між локальною генерацією та централізованим джерелом, оптимізуючи енергетичні та економічні показники системи.

Наукова новизна розділу полягає у формалізації комплексної математичної моделі динаміки 2Н-ІТП, яка вперше враховує двонаправлений теплообмін між споживачем і мережею, а також поведінку теплового просьюмера в умовах реального споживання та змін зовнішніх впливів. Розроблена модель дозволяє виконувати прогнозування ефективності роботи 2Н-ІТП, здійснювати оцінку параметрів енергетичного балансу, а також застосовувати її для оптимізації проєктних рішень. Побудовані алгоритми можуть слугувати основою для створення цифрових двійників 2Н-ІТП — як складової частини інтелектуальних енергосистем.

Практична цінність отриманих результатів полягає у створенні інженерного та методологічного підґрунтя для проєктування та впровадження інноваційних теплових пунктів нового покоління.

У третьому розділі представлено експериментальне дослідження роботи 2Н-ІТП, побудованого на основі розробленої схеми та алгоритмів управління. Метою експерименту було підтвердження працездатності системи, валідація розроблених математичних моделей та виявлення впливу змінних зовнішніх умов на динаміку теплових потоків і режимів циркуляції.

У межах розділу описано побудову фізичного стенду, що моделює 2Н-ІТП з локальним джерелом тепла (електричним котлом як аналогом теплового насоса), баком-акумулятором, регулювальними клапанами, насосами та вимірювальними приладами. Система реалізує три основні режими: споживання тепла з ЦТ, комбіновану подачу з локального та централізованого джерел, а також повернення надлишкової енергії в мережу.

Методика досліджень базувалася на безперервному моніторингу температур, витрат і теплових потоків у ключових точках системи, аналізі перехідних процесів, що виникали при зміні джерел постачання, а також тепловізійному контролю температурного профілю системи.

Результати експерименту підтвердили ефективність реалізованих алгоритмів керування. Виявлено, що при досягненні критичної температури в верхній зоні акумулятора (близько 48 °C), система автоматично переходить у режим рекуперації з передачею до 2,7 кВт теплової енергії назад у мережу. Під час добового тестового циклу з постійним навантаженням на опалення було спожито 13 кВт·год тепла, з яких 12 кВт·год було згенеровано локальним джерелом, а 9 кВт·год повернуто в систему ЦТ. Визначено внесок джерел у комбінованому режимі: централізоване тепло — 76,9 %, локальне — 23,1 %, повернення тепла — 90 % від обсягів локальної генерації.

Польова верифікація результатів здійснена на прикладі об'єкта Danfoss Smart Store (м. Нордборг, Данія), де впроваджено тепловий пункт з функцією зворотного постачання надлишкового тепла від холодильних установок CO₂. Аналіз режимів роботи цього об'єкта підтвердив релевантність отриманих результатів та універсальність підходу до побудови 2Н-ІТП.

Наукова новизна розділу полягає у практичній реалізації принципів двонаправленої взаємодії з тепломережею, підтвердженні гнучкості переходу між режимами, а також у верифікації теплових моделей та керуючих алгоритмів у реальному часі. Експериментально доведено, що сучасна архітектура ІТП може виконувати функцію теплового просьюмера з можливістю інтеграції до декарбонізованих мереж.

Практичне значення досліджень полягає у створенні методики апробації 2Н-ІТП, що може бути використана для типових випробувань інноваційних теплових систем підключених до систем ЦТ та локальних ВДЕ, а також у підготовці інженерних рекомендацій для подальшого впровадження подібних технологій у системах централізованого теплопостачання.

У четвертому розділі розроблено методику інженерного розрахунку 2Н-ІТП, яка забезпечує поєднання алгоритмічних, конструктивних і теплотехнічних аспектів функціонування системи в умовах взаємодії з системою ЦТ і локальними джерелами тепла. Запропоновано структуровані схеми-алгоритми функціонування 2Н-ІТП в режимах автономної, комбінованої та рекуперативної роботи, що дозволяє оптимізувати потоки теплової енергії відповідно до температурного графіка, стану бака-акумулятора та потужності локального джерела.

Окрему увагу приділено функціональній схемі реалізації системи, яка включає регульовальні клапани, теплообмінники, регульовані насоси, бак-акумулятор та інтелектуальний контролер. Висвітлено підсистеми автоматизації та зв'язок компонентів через термодатчики, витратоміри та виконавчі пристрої, що дозволяє гнучко керувати тепловими потоками в реальному часі. Розроблено правила налаштування РІ-регуляторів відповідно до змінних зовнішніх умов.

На основі експериментальних вимірювань проведено масштабування до системи 2Н-ІТП потужністю 85 кВт. Встановлено, що така система дозволяє зменшити споживання тепла з боку ЦТ на 74 %, при цьому до 61 % теплової енергії, виробленої локальним джерелом, може бути повернуто в мережу. Чисті витрати на енергоспоживання за місяць експлуатації склали лише 12,6 тис. грн

проти 120,7 тис. грн в системі без ІТП, а скоригована сезонна економія сягнула 583,5 тис. грн. За інвестиційних витрат 2,15 млн грн розрахований термін окупності становить 3,69 роки, чиста приведена вартість (NPV) – 1,43 млн грн, індекс прибутковості – 1,66. Це підтверджує інвестиційну доцільність упровадження 2Н-ІТП у рамках модернізації систем 4-го та 5-го поколінь ЦТ.

Уперше виконано оцінку впливу інтеграції 2Н-ІТП на параметри системи ЦТ: зниження температур, децентралізація навантажень, зменшення пікового споживання тепла. Сформульовано практичні рекомендації для впровадження, зокрема — необхідність адаптації нормативної документації до нових принципів роботи теплових пунктів.

Наукова новизна розділу полягає в комплексному підході до розрахунку та проєктування 2Н-ІТП, який враховує не лише теплові потоки, але й гнучкість регулювання, цифрову інтеграцію та потенціал енергообміну з ЦТ. Практична значущість — у створенні придатної до реалізації методики, яка може бути використана як у новому будівництві, так і при модернізації існуючих систем.

Ключові слова: централізоване теплопостачання, енергоефективність, тепловий пункт, тепловий насос, розумна енергетична система, відновлювані джерела енергії, двонаправлений тепловий пункт, сталий розвиток, математичне моделювання теплових потоків, скидне тепло, просьмер.

Список публікацій: За результатами досліджень опубліковано 8 наукових праць, у тому числі 4 статті у наукових фахових виданнях та 4 тез доповідей у збірниках матеріалів конференцій.

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Гламаздін, П. М., **Баранчук, К. О.**, & Приймак, О. В. (2021). Нові підходи до організації централізованого теплопостачання. Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання, 39, 38-46. <https://doi.org/10.32347/2409-2606.2021.39.38-46>
2. **Баранчук К. О.**, Любарєць О. П. (2025). Еволюція теплових пунктів: від парових систем до теплових просьюмерів. Вентиляція, освітлення та

- теплогазопостачання, 53, 2025, с. 6-20. <https://doi.org/10.32347/2409-2606.2025.53.6-20>
3. Тимощенко, А., Погосов, О., Пасічник, П., Кулінко, Є., Козячина, Б., & **Баранчук, К.** (2025). Дослідження технологічних систем паропостачання та можливі шляхи підвищення їх енергетичної ефективності на прикладі пристроїв для розморожування вагонів. Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання, 50, 6–28. <https://doi.org/10.32347/2409-2606.2024.50.6-28>
 4. **Баранчук К.,** Погосов О. Адаптація алгоритму Heat Recovery Control для двонаправлених теплових пунктів та аналіз моделей енергетичного ринку. *Прикладна геометрія та інженерна графіка. Випуск 108* (2025). <https://doi.org/10.32347/0131-579X.2024.107.192-206>
Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:
 5. **Баранчук К.О.** Використання відновлюваних джерел енергії при зеленому будівництві та їх комбінування. Матеріали III Міжнародної науково-практичної конференції «Green Construction» («Зелене будівництво»). Київ: Київський національний університет будівництва і архітектури. 2024, с.31-33.
https://www.knuba.edu.ua/wp-content/uploads/2024/05/zbirnyk_gotovyj-4.pdf
 6. **Баранчук К.О.** (2023) Електрифікація централізованого теплопостачання та роль комбінованих теплових пунктів. Робоча програма і тези доповідей міжнародної науково-практичної конференції «Екологія. Ресурси. Енергія» 22-24.11.2023, м. Київ, с. 99-101.
 7. Гламаздін П.М., **Баранчук К.О.** (2023) Перспективи розвитку систем централізованого теплопостачання. Робоча програма і тези доповідей міжнародної науково-практичної конференції «Екологія. Ресурси. Енергія» 22-24.11.2023, м. Київ, с. 87-88. https://www.knuba.edu.ua/wp-content/uploads/2023/11/jere_2023_program_tezy.pdf
 8. Гламаздін П.М., **Баранчук К.О.** (2022) Перспективні напрямки розвитку абонентських введів. Робоча програма і тези доповідей міжнародної

науково-практичної конференції «Екологія. Ресурси. Енергія» 23-25.11.2022, м. Київ, с. 80-81. <http://www.ere.org.ua/>

ABSTRACT

Baranchuk K. Heat supply systems with energy efficiency bidirectional heating substations – Qualification Scientific Work as a Manuscript.

Dissertation for the Degree of Doctor of Philosophy in Specialty 192 "Construction and Civil Engineering" (19 – Architecture and Construction). – Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, 2025.

The main content of the dissertation. The dissertation explores innovative solutions for district heating based on energy efficiency bidirectional individual heating substation (2-way-IHS). The introductory part emphasizes that modern district heating (DH) systems are moving to 4th and 5th generation models with low-temperature networks and a high content of renewable energy sources (RES). IHSs, which not only receive heat from the network, but also transfer excess heat back to the network, are becoming particularly relevant.

The scientific novelty of the work lies in the formulation of the scientific principles of construction and operation of 2-way-IHS, the development of new schemes and algorithms for their operation. The practical significance lies in substantiating the effectiveness of 2-way-IHS for reducing heat losses, integrating local RES, and increasing the flexibility of the DH system. The paper outlines promising areas for the development of modern digital platforms for monitoring and controlling 2-way-IHS which will contribute to further automation of processes, adaptive control and forecasting of thermal loads.

The dissertation contains original scientifically based developments: new schemes of heating substation, methods of modeling and controlling 2-way-IHS, experimental studies and recommendations for practical implementation. These results can be used in the development of regulatory documents regulating the functioning and implementation of IHS, as well as for the design and optimization of real DH systems taking into account deeper integration of RES.

The first chapter provides a comprehensive review of the literature on the development of DH and heating substations. Technologies of different generations of DH are considered: from high-temperature systems of the 1st–3rd generations to

modern concepts of the 4th (4GDH) and 5th (5GDHC) generations with low water temperatures.

Special attention is paid to the architectures of heating substations of different levels - central (CHS), distribution (DHS), individual (IHS), taking into account their functional capabilities, hydraulic structure and technical equipment. It is determined that most traditional IHSs have a unidirectional architecture, which limits the flexibility of interaction with the network, especially in the context of the implementation of RES.

The focus is on the integration of heat pumps, the use of waste heat and digital control systems in new generations of DH. Analysis of literary sources showed that the transition to 4GDH involves reducing the temperature of networks, introducing thermal energy storage and focusing on energy efficiency. The 5th generation combines district heating and cooling systems into a flexible system with extensive use of RES.

In this context, special attention is paid to the problem of RES integration. An analysis of studies describing the use of solar collectors, heat pumps and waste heat sources in DH is presented. It is established that for the successful implementation of RES, it is necessary to reduce the temperature level of networks and modernize the infrastructure, in particular the spread of IHSs. European directives and national legislation on energy efficiency are considered, which stimulate the development of low-temperature integrated DH systems. An analysis of the literature showed that existing IHSs most often have a unidirectional architecture and limited possibilities for integrating local sources.

The review revealed key scientific gaps: the lack of research on 2way-IHS, which are able not only to consume heat, but also to return surpluses to the network. From this point of view, the scientific novelty of the section is the emphasis on the need to develop 2way-IHS as an infrastructure component of "smart" energy systems of the future. The section emphasizes that 2way-IHS expand the possibilities of balancing local heat flows and increase the flexibility of DH, especially when transitioning to 4GDH. The practical significance of this analysis lies in the systematization of known concepts and methods of DH modernization, which creates the basis for the further implementation of energy efficiency solutions. In particular, it

was found that the transition to a low-temperature regime in combination with digital monitoring systems at all levels of DH systems significantly expands the list of available heat sources. The results of the review can be used when updating educational and methodological materials on DH systems and planning the modernization of heating networks, taking into account the needs of integrating RES.

The second chapter is devoted to the development of a schematic diagram and physical and mathematical modeling of 2way-IHS . Within the framework of the section, a new 2way-IHS configuration is proposed, which provides flexible control of heat energy flows between the DH system and local sources, in particular heat pumps, solar collectors and waste heat sources etc. A unique feature of the scheme is the possibility of bidirectional circulation of the coolant with the functions of recovery, accumulation of excess heat and its subsequent transfer back to the heating network.

Typical approaches to the construction of bidirectional schemes using thermal energy storage, mixing units, control valves and circulation pumps are systematized. Special attention is paid to priority control algorithms: for example, when thermal energy is supplied mainly from RES, and the DH source is used only at peak times or for system balancing.

In the second part of the section, a physical and mathematical model of heat flows in the key components of the 2way-IHS is developed: heat exchangers, buffer tanks and hydraulic circuits. Mathematical relationships between temperature differences, water flow rates and heat and mass transfer dynamics are established. An energy balance model of a thermal prosumer is introduced, which takes into account heat energy flows from a DH network, local sources and the amount of excess heat energy transferred to the network. The model allows us to quantitatively assess the coefficient of performance (COP) of the heat pump in the system and its impact on overall energy efficiency.

The key scientific novelty of this section is the development of a new schematic diagram of the 2way-IHS , which is submitted in a patent application with the subsequent transfer of intellectual property rights to the invention.

Adaptive control algorithms developed on the basis of the PI controller take into account the variable dynamics of the heat load, temperature fluctuations of the external environment and the hierarchy of priorities of heat sources. This approach allows for flexible balancing between local generation and a DH source, optimizing the energy and economic indicators of the system.

The scientific novelty of the section lies in the formalization of a complex mathematical model of the dynamics of 2way-IHS, which for the first time takes into account the bidirectional heat exchange between the consumer and the network, as well as the behavior of the thermal prosumer under conditions of real consumption and changes in external influences. The developed model allows for the prediction of the efficiency of the 2way-IHS operation, the assessment of the energy balance parameters, and also its use for the optimization of design solutions. The constructed algorithms can serve as the basis for the creation of digital twins of 2way-IHS - as a component of intelligent energy systems.

The practical value of the results obtained lies in creating an engineering and methodological basis for the design and implementation of innovative new generation heating substations.

The third chapter presents an experimental study of the operation of the 2-way-IHS, built on the basis of the developed scheme and control algorithms. The purpose of the experiment was to confirm the system's operability, validate the developed mathematical models, and identify the impact of variable external conditions on the dynamics of heat flows and circulation modes.

The section describes the construction of a physical stand that simulates the 2-way-IHS with a local heat source (an electric boiler as an analogue of a heat pump), a thermal energy storage, control valves, pumps, and measuring instruments. The system implements three main modes: heat consumption from the DH, combined supply from local and DH sources, and the return of excess energy to the network.

The research methodology was based on continuous monitoring of temperatures, flows, and heat flows at key points of the system, analysis of transient processes that

occurred when changing supply sources, and thermal imaging control of the system's temperature profile.

The results of the experiment confirmed the effectiveness of the implemented control algorithms. It was found that when a critical temperature is reached in the upper zone of the accumulator (about 48°C), the system automatically switches to the recovery mode with the transfer of up to 2.7 kW of thermal energy back to the network. During the daily test cycle with a constant heating load, 13 kWh of heat was consumed, of which 12 kWh was generated by a local source, and 9 kWh was returned to the DH system. The contribution of the sources in the combined mode was determined: DH - 76.9%, local source - 23.1%, heat return - 90% of the volumes of local generation.

Field verification of the results was carried out on the example of the Danfoss Smart Store facility (Nordborg, Denmark), where a heating substation with the function of returning excess heat from CO₂ refrigeration units was implemented. The analysis of the operating modes of this facility confirmed the relevance of the results obtained and the universality of the approach to building a 2-way-IHS.

The scientific novelty of the section lies in the practical implementation of the principles of bidirectional interaction with the heating network, confirmation of the flexibility of the transition between modes, as well as in the verification of thermal models and control algorithms in real time. It has been experimentally proven that the modern architecture of the 2-way-IHS can perform the function of a thermal prosumer with the possibility of integration into decarbonized networks.

The practical significance of the research lies in the creation of a methodology for testing 2-way-IHS, which can be used for typical tests of innovative heating systems connected to DH systems and local RES, as well as in the preparation of engineering recommendations for the further implementation of similar technologies in DH systems.

In the fourth chapter, a methodology for engineering calculation of 2-way-IHS is developed, which provides a combination of algorithmic, constructive and heat engineering aspects of the system's operation in conditions of interaction with the DH system and local heat sources. Structured schemes-algorithms for the operation of 2-

way-IHS in autonomous, combined and recuperative operation modes are proposed, which allows optimizing heat energy flows according to the temperature schedule, the state of the accumulator tank and the power of the local source.

Special attention is paid to the functional scheme of the system implementation, which includes control valves, heat exchangers, adjustable pumps, thermal energy storage and intelligent controller. Automation subsystems and component communication via temperature sensors, flow meters and actuators are highlighted, which allows flexible control of heat flows in real time. Rules for setting PI regulators according to variable external conditions are developed.

Based on experimental measurements, scaling to a 2-way-IHS system with a capacity of 85 kW is carried out. It was found that such a system allows to reduce heat consumption from the DH by 74%, while up to 61% of the heat energy generated by a local source can be returned to the network. Net energy consumption costs per month of operation amounted to only 12.6 thousand UAH against 120.7 thousand UAH in the system without IHS, and the adjusted seasonal savings reached 583.5 thousand UAH. With investment costs of 2.15 million UAH, the calculated payback period is 3.69 years, net present value (NPV) is 1.43 million UAH, and the profitability index is 1.66. This confirms the investment feasibility of implementing 2-way-IHS as part of the modernization of 4th and 5th generation DH systems.

For the first time, an assessment of the impact of 2-way-IHS integration on the parameters of the DH system was performed: temperature reduction, load decentralization, and reduction of peak heat consumption. Practical recommendations for implementation are formulated, in particular, the need to adapt regulatory documentation to the new principles of operation of heating substation.

The scientific novelty of the section lies in the integrated approach to the calculation and design of 2-way-IHS, which takes into account not only heat flows, but also the flexibility of regulation, digital integration and the potential of energy exchange with DH. The practical significance lies in the creation of a methodology suitable for implementation, which can be used both in new construction and in the modernization of existing systems.

Keywords: district heating, energy efficiency, heating substation, heat pump, smart energy system, renewable energy sources, bidirectional heating substation, sustainable development, mathematical modeling of heat flows, waste heat, prosumer.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	20
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ РОЗВИТКУ ТЕПЛОВИХ ПУНКТІВ В СИСТЕМАХ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ.....	31
1.1 Системи теплопостачання.....	31
1.2 Загальний огляд теплових пунктів.....	36
1.2.1 Центральні теплові пункти.....	37
1.2.2 Розподільчі теплові пункти.....	42
1.2.3 Покоління теплових пунктів та огляд літератури.....	46
1.2.4 Індивідуальні теплові пункти в Україні.....	80
1.3 Фізико-математичне моделювання теплових потоків та тепломасообмінних процесів в елементах конструкції теплових пунктів.....	94
1.4 Експериментальні дослідження теплотехнічних характеристик теплових пунктів.....	111
1.5 Висновки.....	123
РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА ПРИНЦИПОВОЇ СХЕМИ ТА ФІЗИКО- МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ДВОНАПРАВЛЕНОГО ТЕПЛОВОГО ПУНКТУ.....	125
2.1 Розробка схеми двонаправленого теплового пункту.....	125
2.2 Фізико-математичне моделювання теплових потоків і тепломасообмінних процесів в теплообмінниках і акумуляторах теплоти.....	133
2.3 Висновки.....	144
РОЗДІЛ 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОТЕХНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДВОНАПРАВЛЕНОГО ТЕПЛОВОГО ПУНКТУ.....	146
3.1 Експериментальний стенд.	146
3.2 Методика експериментальних досліджень.....	158
3.3 Аналіз результатів експериментальних досліджень.	164

3.4	Верифікація результатів експерименту на прикладі супермаркету Smart Store (принципи 2Н-ІТП).....	174
3.5	Висновки.....	182
РОЗДІЛ 4. МЕТОДИКА ІНЖЕНЕРНИХ РОЗРАХУНКІВ		
	ДВОНАПРАВЛЕНОГО ТЕПЛОВОГО ПУНКТУ.....	184
4.1	Схеми-алгоритми роботи.....	184
4.2	Теплотехнічні характеристики.....	190
4.3	Функціональна схема.....	204
4.4	Підсистеми автоматизації.....	208
4.5	Техніко-економічні показники.....	214
4.6	Оцінка впливу на систему централізованого теплопостачання та рекомендації щодо впровадження.....	222
4.7	Висновки.....	230
	ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	233
	СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	240
	ДОДАТОК А Список опублікованих праць за темою дисертації.....	247
	ДОДАТОК Б Модель 2Н-ІТП у вигляді коду для використання в середовищі MATLAB.....	249
	ДОДАТОК В Налаштування електронного регулятора під час експериментальних досліджень.....	254
	ДОДАТОК Г Договір про передачу прав інтелектуальної власності на винахід, що супроводжує патентну заявку IN 18196.....	259
	ДОДАТОК Д Патентна заявка IN 18196 від 24.05.2024.....	261
	ДОДАТОК Е Акт впровадження результатів роботи.....	264

ВСТУП

Обґрунтування вибору теми наукового дослідження. Розвиток систем централізованого теплопостачання (ЦТ) у Європі та в Україні супроводжується поступовим переходом до моделей 4-го та 5-го поколінь, що передбачають зниження температурного графіка, підвищення частки відновлюваних джерел енергії (ВДЕ), інтеграцію теплових насосів, накопичувачів енергії та цифрових технологій управління. Одним із ключових викликів таких систем є необхідність забезпечення гнучкості, двосторонньої взаємодії між джерелами та споживачами теплової енергії, а також адаптації до децентралізованих джерел тепла.

У цьому контексті особливу актуальність набувають індивідуальні теплові пункти нового покоління — двонаправлені ІТП (2Н-ІТП), які здатні не лише приймати тепло від централізованої мережі, а й передавати надлишкову теплову енергію, сформовану на об'єкті, назад у мережу. Такі функціональні вузли є необхідною інфраструктурною складовою майбутніх енергосистем з високою часткою ВДЕ, розвитком теплових просьюмерів і цифровим керуванням споживанням.

Обґрунтування вибору теми також зумовлене потребою адаптації українських систем ЦТ до нових умов енергетичної безпеки, підвищення ефективності використання ресурсів, зменшення втрат у мережах та інтеграції нових технологій без потреби масштабної реконструкції. Водночас, наявні нормативні підходи, типові рішення та методики розрахунків ІТП не враховують нових сценаріїв двосторонньої взаємодії та комбінованого використання декількох джерел тепла.

Таким чином, вибір теми дослідження зумовлений як стратегічною важливістю інтеграції 2Н-ІТП у сучасні та перспективні теплові мережі, так і відсутністю системного наукового підходу до їх проєктування, оптимізації та експлуатації в умовах зміни енергетичної парадигми.

Актуальність теми. Централізоване теплопостачання, як і світовий енергетичний сектор загалом, зазнає суттєвих змін, обумовлених глобальною

трансформацією енергетичних систем. Основними напрямками цих змін є збільшення частки відновлюваних джерел енергії (ВДЕ), впровадження кліматично нейтральних технологій, цифровізація управління енергетичними процесами та інтеграція інноваційних рішень, спрямованих на формування декарбонізованої та стійкої енергетичної інфраструктури.

Окрім загальносвітових тенденцій, на енергетичний сектор України критично впливають воєнні дії, які висунули енергетичну безпеку на перший план, витіснивши інші глобальні пріоритети. Енергетична інфраструктура стала об'єктом цілеспрямованих атак, що суттєво ускладнює функціонування систем централізованого теплопостачання та безпосередньо впливає на життєдіяльність цивільного населення.

В сучасних умовах одним із ключових стратегічних напрямів трансформації енергетичної системи України є її децентралізація, яка охоплює також сектор централізованого теплопостачання. Децентралізація сприяє підвищенню енергетичної безпеки через розосередження джерел енергії, диверсифікацію постачання енергетичних ресурсів і розширене використання місцевих ВДЕ. Водночас централізована модель транспортування енергії (як теплової, так і електричної) залишається найбільш ефективною, оскільки забезпечує системну стабільність та надійність постачання.

Розвиток комбінованих та двонаправлених теплових пунктів є важливим кроком у модернізації централізованих систем теплопостачання, що зумовлює наукову та практичну значущість цього дослідження. Відмінною особливістю таких теплових пунктів є їх здатність забезпечувати інтеграцію локальних джерел енергії в централізовану мережу. У стандартних режимах експлуатації локальні енергогенеруючі установки можуть частково або повністю покривати потреби споживачів у певні періоди часу, тоді як централізована мережа залишається базовим джерелом енергопостачання. Така схема дозволяє оптимізувати споживання енергоресурсів і підвищити загальну ефективність системи.

Крім того, у випадку аварійної ситуації або повної втрати працездатності централізованої мережі, локальні енергогенеруючі установки можуть забезпечити мінімальний або оптимальний рівень енергопостачання для критичних потреб споживача. Це особливо актуально в контексті підвищення стійкості систем теплопостачання до зовнішніх загроз, включаючи військові ризики, кліматичні зміни та техногенні фактори.

Двонаправлені теплові пункти є подальшим розвитком комбінованих теплових пунктів, у конструкцію яких інтегровано технічні рішення для передачі надлишкової теплової енергії до централізованої мережі. Така модель функціонування дозволяє ефективно балансувати енергетичні потоки: у періоди низького попиту надлишок тепла може бути переданий до мережі, а під час пікового споживання – отримана додаткова енергія. Це сприяє трансформації традиційного споживача в теплового просьюмера (англ. prosumer – producer + consumer). Подібна модель вже функціонує на ринку електроенергії, де власники приватних сонячних електростанцій можуть продавати надлишкову електроенергію в мережу.

Окрім концептуальних змін у структурі систем централізованого теплопостачання, комбіновані та двонаправлені теплові пункти сприяють підвищенню енергоефективності кінцевого споживача. Покращення енергоефективності є ключовим фактором, що забезпечує зниження рівня енергетичної бідності, підвищення енергетичної безпеки, економічне зростання без збільшення викидів парникових газів та інтеграцію ВДЕ. Такі теплові пункти сприяють більш широкому впровадженню ВДЕ, що, у свою чергу, стимулює підвищення рівня автоматизації інженерних систем, зменшення теплових втрат та оптимізацію споживання. В результаті формується надлишок теплової енергії, який дозволяє перетворити комбінований тепловий пункт на двонаправлений, а кінцевий споживач стає активним учасником ринку тепла.

Розробка та впровадження комбінованих і двонаправлених теплових пунктів є надзвичайно актуальною в контексті виконання вимог оновлених Директив ЄС 2024/127 «Про енергетичну ефективність будівель» та ЄС

2023/1791 «Про енергетичну ефективність». Зокрема, у цих директивах визначено:

- 2040 рік як орієнтовну дату повної відмови від систем опалення й охолодження, що працюють на викопному паливі,
- досягнення високих показників енергоефективності будівельного фонду до 2050 року,
- перехід систем централізованого тепло- та холодопостачання на використання виключно відновлюваних джерел енергії та скидного тепла до 1 січня 2050 року.

Відповідні базові Директиви вже імплементовані в Україні у вигляді національних законодавчих актів, а їх оновлення обумовлює подальші зміни регуляторного поля.

Актуальність дослідження також зумовлена необхідністю пошуку нових рішень та технологій, які забезпечать перехід до енергетичних систем нового покоління в процесі повоєнного відновлення та майбутнього розвитку країни. Сектор централізованого теплопостачання залишається важливою складовою цих систем, проте існуючі рішення не здатні повною мірою задовольнити потребу у комбінованому використанні різних джерел енергії на різних рівнях – як на рівні енергетичних мереж, так і на рівні кінцевого споживача.

Теплові пункти, зокрема індивідуальні, завжди відігравали ключову роль у централізованих системах теплопостачання, а в умовах енергетичної трансформації їх значення лише зростає. Впровадження нових технологічних рішень потребує глибокого науково-технічного аналізу, математичного моделювання та експериментальної апробації комплексу обладнання, що входить до складу теплового пункту.

У цій роботі представлено розробку низки рішень під загальною назвою «системи теплопостачання з енергоефективними тепловими пунктами», які здатні вирішити актуальні завдання енергетичної трансформації України та сприяти розвитку новітніх централізованих систем теплопостачання у світі.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконана згідно з Державною “Програмою підтримки енергоефективності в Україні” і безпосередньо пов'язана з планами держбюджетних тематик Київського національного університету будівництва і архітектури на замовлення Міністерства освіти і науки України (№ державної реєстрації 0122U001197 та 0114U002579).

Мета дослідження. Метою дисертаційної роботи є наукове обґрунтування концепції, розроблення методів розрахунку та управління, а також оцінка ефективності двонаправлених теплових пунктів як ключового елементу енергоефективних систем теплопостачання. Дослідження спрямоване на визначення принципів функціонування таких теплових пунктів, інтеграцію їх у централізовані теплові мережі та розроблення алгоритмів керування, що дозволять оптимізувати розподіл енергетичних потоків, забезпечити автоматизацію регулювання теплового навантаження та підвищити гнучкість і стійкість систем централізованого теплопостачання.

Крім того, метою роботи є розроблення нових принципів управління тепловими потоками в умовах мультіджерельного теплопостачання, включаючи можливість інтеграції відновлюваних джерел енергії та технологій повернення надлишкової теплової енергії в теплову мережу.

Завдання дослідження. Для досягнення поставленої мети були сформульовані та вирішені такі основні наукові та прикладні завдання:

1. *Аналіз науково-технічного стану розвитку теплових пунктів*
 - Провести системний аналіз літературних джерел, етапів розвитку та існуючих рішень ІТП;
 - Дослідити сучасні напрацювання відносно 2Н-ІТП.
2. *Дослідження методів управління та регулювання теплових потоків*
 - Виконати фізико-математичне моделювання теплових потоків та тепломасообмінних процесів в елементах конструкції теплових пунктів;

- Дослідити алгоритми управління тепловими потоками в ІТП.
- 3. *Розробка математичної моделі та експериментальних досліджень*
 - Визначити основні та допоміжні технічні елементи системи 2Н-ІТП;
 - Розробити математичну модель функціонування 2Н-ІТП з урахуванням динаміки споживання, коливань навантаження та можливості передачі надлишкової енергії в мережу;
 - Провести експериментальні дослідження на фізичній моделі 2Н-ІТП та оцінити його ефективність у різних режимах роботи.
- 4. *Методологія розрахунку та розробка алгоритмів управління*
 - Розробити методологію інженерного розрахунку 2Н-ІТП;
 - Визначити оптимальні характеристики ключових компонентів (теплообмінники, насоси, регулювальні клапани, датчики тощо).
- 5. *Оцінка впливу 2Н-ІТП на систему ЦТ*
 - Провести теоретичне обґрунтування доцільності впровадження 2Н-ІТП у системах ЦТ.
- 6. *Розробка рекомендацій та перспективи впровадження*
 - Визначити основні напрямки майбутнього розвитку технології 2Н-ІТП у контексті глобальних трендів енергоефективності, декарбонізації та інтеграції ВДЕ;
 - Надати пропозиції щодо адаптації українських нормативно-правових актів для стимулювання впровадження енергоефективних ІТП.

Об'єкт дослідження: принципи управління та експериментальна установка 2Н-ІТП, що функціонує у комбінованому та двонаправленому режимах з можливістю передачі надлишкової теплової енергії в мережу.

Предмет дослідження: алгоритми керування, методи розрахунку, вибір обладнання та наукові засади впровадження 2Н-ІТП у системи ЦТ. Дослідження охоплює математичне моделювання процесів регулювання теплових потоків, балансування енергоспоживання між локальними джерелами та мережею, а

також перехід споживача в статус просьюмера через інтеграцію технологій повернення надлишкової енергії в систему.

Методи дослідження. Дослідження ґрунтується на комплексному підході, що включає теоретичні, емпіричні, експериментальні та математичні методи.

- *Теоретичні методи:* аналіз, систематизація, узагальнення, порівняння та класифікація для уточнення понять, обґрунтування методологічних засад і формулювання висновків;
- *Емпіричні методи:* моніторинг, консультації, аналіз існуючих рішень та оцінка ринку для визначення можливостей впровадження 2Н-ІТП;
- *Моделювання:* розробка експериментальної моделі 2Н-ІТП, математичне моделювання, створення алгоритмів керування та автоматизації;
- *Експериментальні методи:* тестування на спеціально створеному стенді, проведення діагностичних, констатувальних і формувальних експериментів для оцінки ефективності запропонованого рішення;
- *Методи системного аналізу:* дослідження впровадження та експлуатації теплових пунктів в Україні та світі, порівняння розробленого теплового пункту з існуючими аналогами.

Математична обробка даних: обчислення та аналіз експериментальних результатів у Microsoft Excel, MATLAB, а також обробка даних експериментального дослідження за допомогою Danfoss Leanheat Monitor.

Наукова новизна роботи.

Уперше:

- науково обґрунтовано інженерно-технічні основи роботи 2Н-ІТП як конструктивного елементу систем тепlopостачання для реалізації функцій теплового споживача і виробника теплової енергії;
- запропоновано оригінальну конструктивну схему 2Н-ІТП, яка забезпечує акумулювання і передачу надлишкової теплоти від локального джерела теплоти в мережу централізованого тепlopостачання;

- розроблено фізико-математичну модель тепломасообмінних процесів 2Н-ІТП, що описує двонаправлений теплообмін в теплообмінниках та роботу системи за змінних зовнішніх кліматичних умов і теплових навантажень;
- проаналізовано результати експериментальних досліджень роботи 2Н-ІТП, що функціонує в двонаправленому режимі і підтверджено здатність теплового пункт змінювати режими роботи в реальному часі та забезпечувати передачу теплоти в зворотному напрямку до тепломережі.

Удосконалено:

- Схему 2Н-ІТП на основі експериментальних досліджень. Внесено покращення в гідравлічну конфігурацію, інтегровано адаптивне управління циркуляційними насосами та використано багатофункціональні регулювальні клапани. Це забезпечило підвищену ефективність в режимах споживання, акумулювання та рекуперації тепла, а також підтверджено здатність системи до роботи в моно- та бівалентному режимах з можливістю зворотної подачі енергії в тепломережу;
- Принципи регулювання в первинному та вторинному контурах 2Н-ІТП, зокрема через використання комбінованого клапана з урахуванням витратних характеристик клапана і теплообмінника, а також впровадження швидкодіючого електроприводу на триходовому клапані у вторинному контурі. Це дозволило підвищити швидкість реакції системи на зміну температурного режиму та стабілізувати теплові потоки;
- Математичну модель роботи 2Н-ІТП, яка враховує динаміку теплових процесів у змінних режимах експлуатації. Модель може бути адаптована для побудови цифрових двійників теплових пунктів з метою аналізу ефективності, прогнозування роботи в різних режимах і підтримки прийняття рішень у цифрових енергетичних платформах;
- Підхід до вибору основного обладнання для комбінованих та 2Н-ІТП, включаючи теплообмінники, регулювальну арматуру, баки-акумулятори, контролери та засоби дистанційного моніторингу. Розроблено рекомендації щодо оновлення моделі ринку теплової енергії з урахуванням інтеграції теплових

просьюмерів як активних учасників з правом купівлі, генерації та продажу теплової енергії в рамках децентралізованої інфраструктури.

В роботі одержані практично важливі результати:

- Теоретично обґрунтовано та експериментально підтверджено енергоефективність 2Н-ІТП як інструменту інтеграції локальних ВДЕ у систему ЦТ. Показано, що 2Н-ІТП забезпечують зниження температурного графіка, зменшення теплових втрат у мережі та підвищення частки локального теплогенерування;

- Розроблено математичні моделі енергетичного балансу теплового просьюмера, які описують взаємодію між споживанням, генерацією та поверненням надлишкової енергії в ЦТ. Моделі враховують змінний тепловий попит та наявність локальних джерел;

- Побудовано експериментальну модель 2Н-ІТП, яка реалізує режими моно- та бівалентного постачання тепла, накопичення надлишкової енергії та її зворотну передачу в мережу. Отримано критеріальні залежності ефективності теплообміну в умовах двонаправленої циркуляції теплоносія, що враховують швидкість потоку, температуру та тип джерела тепла.

- Розроблено методику експериментального дослідження динамічної поведінки теплового просьюмера, яка дозволяє визначати оптимальні режими роботи системи;

- Запропоновано техніко-економічну модель оптимального управління потоками тепла в межах 2Н-ІТП з урахуванням змін попиту, температури зовнішнього повітря та вартості енергії. Моделі дозволяють мінімізувати витрати шляхом використання ВДЕ, акумулювання надлишкового тепла та його реалізації у мережу;

- Розроблено алгоритми керування на базі пропорційно-інтегрального контролера з урахуванням температурних коливань, сезонної динаміки та пріоритетів джерел тепла;

- Проведено теоретичну оцінку впливу впровадження 2Н-ІТП на роботу системи ЦТ, зокрема зменшення пікових навантажень, децентралізацію

теплових потоків та покращення гнучкості енергосистеми. Це обґрунтовує потребу в оновленні нормативної бази з урахуванням нових принципів функціонування ІТП;

- розроблено комплексну методику інженерних розрахунків, яка враховує не лише теплотехнічні характеристики, але й можливість цифрової інтеграції, гнучке регулювання, техніко-економічну доцільність та вплив на всю систему ЦТ;

- визначено основні бар'єри впровадження (технічні, регуляторні, ринкові) та сформульовано систему рекомендацій, серед яких — адаптація законодавства для теплових просьюмерів, запровадження гнучких тарифів, розвиток ринку тепла (включаючи peer-to-peer торгівлю), а також гармонізація із європейськими директивами (зокрема EU/2023/1791).

Одержані наукові та прикладні результати становлять завершену систему теоретичних положень, інженерних рішень і практичних рекомендацій для проєктування, оптимізації та впровадження 2Н-ІТП нового покоління. Дослідження створює підґрунтя для модернізації ЦТ з урахуванням тенденцій децентралізації, цифровізації та декарбонізації, а також для розвитку моделі ринку теплової енергії з активною участю теплових просьюмерів. Сукупність отриманих результатів дозволяє кваліфікувати дослідження як значний внесок у розробку та впровадження нових схем інтеграції теплових просьюмерів, що забезпечують підвищення енергоефективності, оптимізацію роботи теплових мереж та розвиток майбутньої моделі ринку теплової енергії.

Особистий внесок здобувача. Усі основні наукові та практичні результати, представлені в дисертаційній роботі та винесені на захист, отримані автором особисто.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу та чотирьох розділів основної частини, загальних висновків, списку використаних літературних джерел із 93 найменувань, 6 додатків, викладена на 264 сторінках друкованого тексту, зокрема 218 сторінок основного тексту, 67 рисунків і 11 таблиць.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ РОЗВИТКУ СИСТЕМ ЦЕНТРАЛІЗОВАНОГО ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ ТА РОЗВИТОК ІНДИВІДУАЛЬНИХ ТЕПЛОВИХ ПУНКТИВ В ЇХ СТРУКТУРІ

1.1 Системи теплопостачання

Системи централізованого теплопостачання (ЦТ) є ключовим елементом сучасних енергетичних систем та відіграють важливу роль у забезпеченні енергоефективності, зниженні викидів парникових газів та досягненні кліматичних цілей. Це підтверджується оновленою Директивою «Про енергетичну ефективність» EU/2023/1791 [1], яка визначає зобов'язання країн ЄС скоротити енергоспоживання на 11,7% до 2030 року та досягти кліматичної нейтральності до 2050 року [2].

Оновлена Директива містить норми, які потенційно трансформують сектор ЦТ не лише в Європі, а й у країнах, що впроваджують європейське законодавство, зокрема в Україні. Закон України «Про енергетичну ефективність», який було розроблено на основі Директиви 2012/27/EU, вже зараз потребує актуалізації з урахуванням нових вимог EU/2023/1791.

Серед ключових вимог до ЦТ та систем централізованого холодопостачання (ЦХ) оновленої Директиви можна виділити поступове збільшення частки відновлюваної енергії та скидного тепла:

- До 2027 року: частка відновлюваної енергії або скидного тепла повинна становити щонайменше 50%;
- До 2035 року: загальна частка відновлюваної енергії, скидного тепла або високоефективного тепла когенерації має бути не менше 80%, при цьому відновлюваної енергії – не менше 35%;
- До 2050 року: перехід СЦТ та СЦХ на повністю відновлювані джерела енергії та скидне тепло.

Ці вимоги визначають необхідність поступового переходу до інтелектуальних теплових мереж та систем 4-го покоління або 4ПЦТ [3, 4]. Умови впровадження таких систем вимагають вдосконалення технологічної

інфраструктури, включаючи індивідуальні теплові пункти (ІТП), що забезпечують інтеграцію різних джерел енергії та підвищують енергоефективність кінцевого споживання. Еволюція ЦТ відображає зміни у структурі енергетичних ресурсів, джерел, рівнях температур та загальної ефективності (Рис. 1.1).

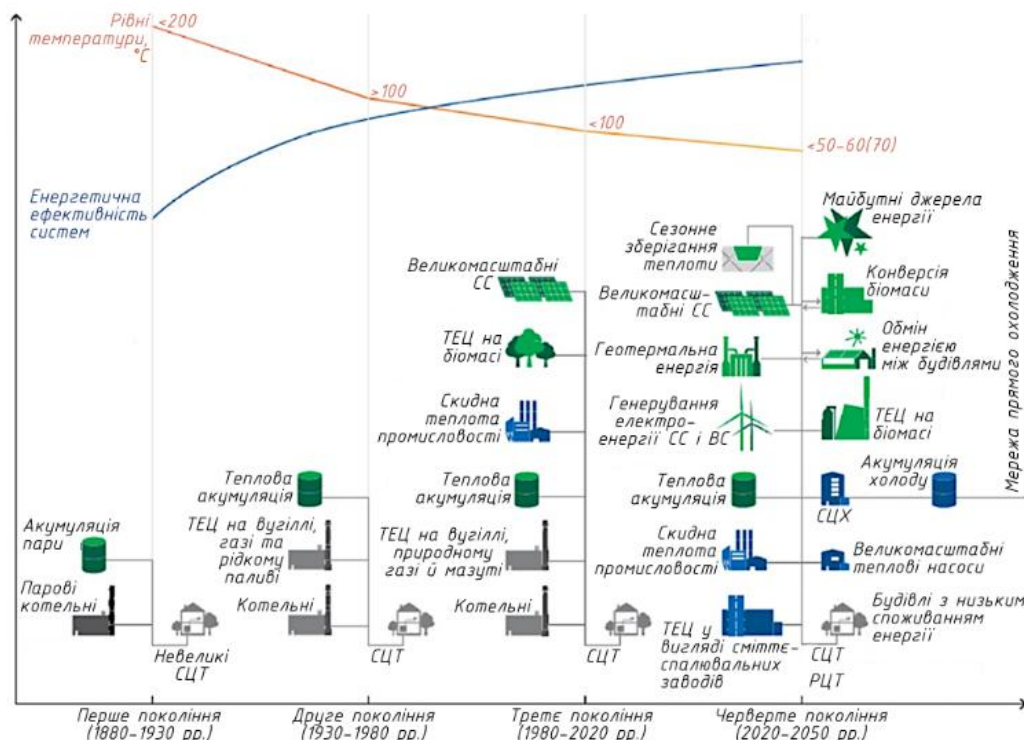


Рис.1.1 Еволюція систем ЦТ в чотирьох поколіннях з концептуальним графіком енергетичної ефективності та рівня температури залежно від часу, року: СЦТ або ЦТ – системи централізованого теплопостачання; СЦХ або ЦХ – системи централізованого холодопостачання; РЦТ – розроблення (покоління) централізованого теплопостачання та енергетичних систем/період найкращих доступних технологій.

Аналізуючи еволюційні зміни ЦТ, що представлені в Таблиці 1 можна зробити висновок, що системи 4ПЦТ є логічним еволюційним кроком у розвитку теплових мереж, спрямованим на зменшення енергоспоживання, інтеграцію відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) та цифровізацію управління. Головними відмінностями 4ПЦТ є перехід на низькотемпературні теплоносії ($\leq 50^{\circ}\text{C}$), використання скидного тепла та теплових насосів, а також впровадження теплових пунктів з інтелектуальним управлінням в тому числі двонаправлених (2Н-ІТП).

Таблиця 1. Особливості чотирьох поколінь

Покоління Особливості	I	II	III	IV
Періоди розвитку	1880-1930	1930 – 1980	1980 – 2020	2020 – 2050
Первинні ресурси	Вугілля	Вугілля, природний газ, мазут	Вугілля, природний газ, біомаса, сміття, скидне тепло, сонячна, геотермальна енергія, низькопотенційне тепло навколишнього середовища	Скидне тепло промисловості, біомаса та біогаз, сміття, сонячна, геотермальна енергія, низькопотенційне тепло навколишнього середовища, синергія з сектором ЦХ.
Акумуляція	Відсутня	Короткострокова	Короткострокова і сезонна	Короткострокова і сезонна
Вид теплоносія	Водяна пара	Вода з високою температурою та тиском	Вода з середньою температурою та тиском	Вода та водогліколева суміш з низькою температурою
Температура води в подавальному трубопроводі, °C	≥200	≥150	≤100	≤60
Температура води в зворотному трубопроводі, °C	-	≥70	≥50	≥25
Системи транспортування	Металеві неізолювані трубопроводи, часто без повернення конденсату	Металеві погано ізолювані труби в бетонних каналах	Попередньо-ізолювані труби в бетонних та без них з системою моніторингу стану ізоляції	Подвійні попередньо-ізолювані труби в бетонних та без них з системою моніторингу стану ізоляції
Регулювання на рівні мережі	-	Центральні теплові пункти	Розподільчі теплові пункти	Розподільчі теплові пункти
Регулювання на рівні споживача	Нерегульовані системи або використання регуляторів прямої дії	Нерегульовані системи, використання регуляторів прямої дії та обмеженої автоматизації	Автоматизовані теплові пункти без моніторингу та віддаленого керування	Автоматизовані теплові пункти з моніторингом, аналізом та віддаленим керуванням, в тому числі, з використанням штучного інтелекту.

Для України впровадження 4ПЦТ має особливе значення у контексті післявоєнної відбудови енергетичної інфраструктури. Більшість українських міст все ще використовують технології 2-го та 3-го покоління, що характеризуються високотемпературними режимами ($\geq 100^{\circ}\text{C}$), централізованими точками регулювання (ТЕЦ, центральні теплові пункти) та значними тепловими втратами через застарілі трубопровідні мережі. Перехід до систем 4ПЦТ потребує масової модернізації теплових мереж, масового впровадження ІТП та широкого використання цифрових технологій, включаючи моніторинг, предиктивне регулювання та оптимізацію енергоспоживання в реальному часі.

Значним викликом для України є фінансування та регуляторна підтримка переходу до 4ПЦТ, проте війна вже змусила міста переглянути підходи до теплопостачання. Відновлення інфраструктури після цілеспрямованих атак на ТЕЦ потребує децентралізації систем теплопостачання, розвитку локальних джерел тепла (ВДЕ, когенерація, утилізація скидного тепла) та впровадження ІТП, здатних адаптуватися до змін енергетичного балансу. У цьому контексті 2Н-ІТП стають ключовим елементом, що дозволяє балансувати мережеве навантаження, зменшувати пікові навантаження та інтегрувати локальні джерела тепла у загальну систему.

Розвиток систем ЦТ є нерівномірним у різних країнах і регіонах, що зумовлено історичними, економічними та технологічними факторами. Як показано на Рис. 1.2, перехід між поколіннями не є лінійним: у той час як деякі країни ще експлуатують мережі 2-го покоління, інші вже активно впроваджують 4-те.

В Україні модернізація систем теплопостачання відбувається поступово. Перехід від 2-го до 3-го покоління, що розпочався у 2010-х роках, досі не завершений [5]. Багато тепломереж все ще працюють за принципами централізованого регулювання з високотемпературними теплоносіями та значними втратами енергії. Водночас, вже впроваджуються окремі елементи

4ПЦТ: з'являються інтелектуальні веб-сервіси для управління ІТП, вдосконалені вузли регулювання, у тому числі з все більшим використанням полімерних матеріалів, а рівень температур розподілу продовжує знижуватись.

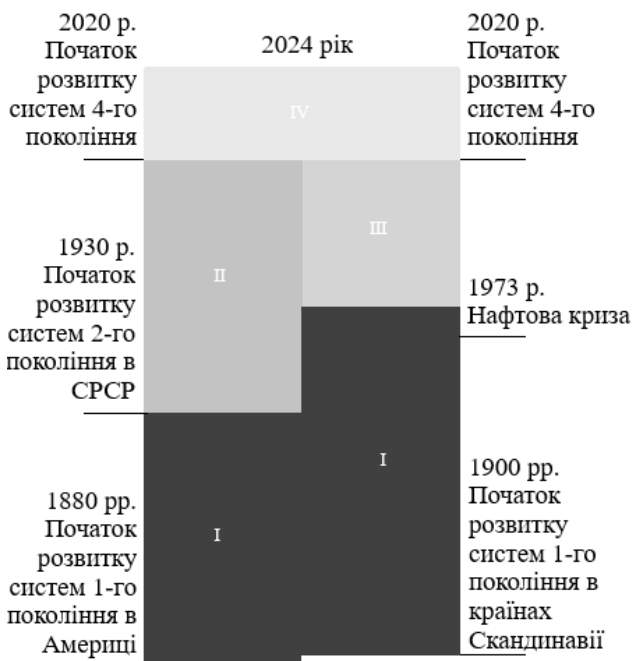


Рис.1.2 Нерівномірність розвитку поколінь ЦТ

В контексті подальшого розвитку 4ПЦТ впровадження 2Н-ІТП є особливо актуальним для України в умовах необхідності відновлення та модернізації енергетичної інфраструктури, яка зазнала значних руйнувань через військові дії. Децентралізація теплопостачання, інтеграція ВДЕ та розвиток технологій балансування теплових потоків дозволять підвищити стійкість та енергонезалежність міст.

Так 2Н-ІТП відіграють важливу роль дозволяючи:

- Оптимізувати локальне енергоспоживання шляхом інтеграції ВДЕ, таких як сонячні колектори, теплові насоси, біомаса тощо.
- Передавати надлишкове тепло від локальних джерел у мережу.

Забезпечити роботу в різних режимах:

Стандартний режим – споживач отримує тепло від системи ЦТ;

Просьюмерський режим – надлишкове тепло повертається в мережу, компенсуючи пікові навантаження;

Аварійний режим – автономне теплопостачання у разі відключення ЦТ.

2Н-ІТП є ефективним інструментом балансування енергетичних потоків, підвищують гнучкість системи ЦТ, дозволяючи адаптувати її до змінних умов споживання та інтеграції локальних джерел тепла.

Застосування автоматизованих алгоритмів керування та предиктивного аналізу (AI/ML-моделей) забезпечує динамічне балансування споживання та генерації тепла в реальному часі, зменшуючи енергетичні втрати та підвищуючи ефективність роботи всієї теплової мережі.

Таким чином, розвиток 2Н-ІТП є важливим напрямом модернізації ЦТ в Україні та Європі. Це дослідження спрямоване на наукове обґрунтування принципів функціонування, розробку методів управління та визначення ефективності впровадження 2Н-ІТП, що дозволить підвищити стійкість, енергоефективність та адаптивність теплових мереж до сучасних викликів та майбутніх змін енергетичного балансу.

1.2 Загальний огляд теплових пунктів

Тепловий пункт є ключовим елементом системи ЦТ, призначеним для прийому, перетворення (зазвичай із вищого рівня параметрів на нижчий, наприклад, тиску чи температури) та розподілу теплової енергії. Тепловий пункт складається з комплексу автоматичних пристроїв та обладнання, які забезпечують підключення до теплової мережі (а за потреби — до мереж холодного водопостачання), регулювання режимів роботи, захист вторинної мережі від аварійного підвищення параметрів і приєднання систем теплоспоживання — теплового району, групи будівель або окремого споживача (будівлі) до теплової інфраструктури.

Залежно від призначення та місця розташування в структурі ЦТ, теплові пункти класифікуються на центральні (ЦТП), індивідуальні (ІТП) та розподільчі (РТП). У європейській практиці РТП розглядаються як еволюція ЦТП і використовуються на рівні мереж для оптимізації параметрів теплоносія.

Детальніше про визначення, особливості та еволюцію кожного типу теплових пунктів описано в окремих розділах цієї роботи.

Аналіз наукової та навчально-методичної літератури свідчить про значні напрацювання в галузі вдосконалення схем теплових пунктів, систем регулювання та контролю їхніх параметрів. Проте для глибшого розуміння складних трансформаційних процесів, що відбуваються в теплових пунктах, необхідно прослідкувати їхній розвиток від початкових систем регулювання до сучасних інновацій. Особливу увагу в дослідженнях приділено ІТП як критично важливим елементам для підвищення енергоефективності ЦТ на рівні будівель. Технічні рішення, застосовані в ІТП, часто адаптуються для ЦТП та РТП, забезпечуючи гнучкість і адаптивність систем. У контексті цієї роботи особливий акцент зроблено двонаправлених теплових пунктах, які можуть охоплювати теплові пункти різних рівнів, але найбільше значення мають при застосуванні в ІТП через їхню роль у забезпеченні енергоефективності та можливостей зворотного енергопостачання від споживачів (модель просьюмера).

Еволюційні процеси, що відбувалися в розвитку ТП, структуровані в цій роботі відповідно до фундаментального дослідження поколінь ЦТ, зокрема концепції 4ПЦТ (четверте покоління ЦТ) [6]. На основі цього сформульовано концепцію поколінь теплових пунктів, деталі якої викладено в подальших розділах [7].

1.2.1 Центральні теплові пункти

Центральні теплові пункти (ЦТП) стали важливим елементом 2-го покоління (2ПЦТ) централізованого теплопостачання, забезпечуючи гідравлічну розв'язку, адаптацію температурного режиму та розподіл теплового навантаження між різними групами споживачів. Їх впровадження було зумовлене такими факторами:

- Високий рівень температур у магістральній мережі, що перевищував допустимі значення для інженерних систем будівель (особливо при тепlopостачанні від ТЕЦ, АЕС, великих котелень);
- Високий тиск у магістральних трубопроводах, що унеможлиблював пряме підключення будівель без відповідного зниження тиску;
- Різномірне теплове навантаження серед груп споживачів (опалення, гаряче водопостачання (ГВП), вентиляція);
- Обмеження щодо розміщення великогабаритного обладнання (насоси, теплообмінники) у приміщеннях житлових будівель, а також підвищений рівень шуму від його роботи;
- Відсутність ІТП з автоматизованим регулюванням параметрів тепlopостачання.

Завдяки централізованому розташуванню регулюючого та теплообмінного обладнання, ЦТП дозволяли зменшити складність балансування мережі та скоротити витрати на окреме обладнання в кожній будівлі. Проте, у конфігурації 2ПЦТ, де на стороні споживача використовувалися нерегульовані системи без обліку теплової енергії, а ЦТП працювали на примітивній автоматизації, виникало багато проблем, зокрема високі теплові втрати та низька енергоефективність.

Зазвичай ЦТП обслуговували невеликі групи будівель, через що можна зустріти альтернативну назву – групові теплові пункти. В системах 2-го покоління застосовувалося більше 40 схем підключення ЦТП, серед яких найбільш поширеними є дві основні:

1. Залежне приєднання системи опалення та двоступеневе змішане системи ГВП (Рис. 1.3):
 - Використовується для групи будівель висотою до 9 поверхів;
 - В ЦТП розміщені теплообмінники для ГВП, а система опалення підключається за залежною схемою через гідрорелеватори в ІТП кожного будинку;

- Така схема є простою та економічною, проте не забезпечує достатнього рівня гідравлічного регулювання та енергоефективності.

Система опалення: Залежне приєднання передбачає пряме з'єднання опалювальних систем будівель із магістральною мережею без гідравлічного розподілу, що реалізується за допомогою гідроелеваторів у ІТП. Гідроелеватори забезпечують змішування теплоносія з магістральної мережі (зазвичай із високою температурою, до 150°C) із зворотним потоком, щоб досягти потрібної температури для опалення (зазвичай $70\text{--}90^{\circ}\text{C}$). Це дозволяє підтримувати базовий рівень тепlopостачання, але обмежує гнучкість регулювання.

Система ГВП: Двоступенева схема ГВП у ЦТП передбачає використання двох послідовно підключених теплообмінників: перший підігріває холодну воду з водопроводу (температура $5\text{--}15^{\circ}\text{C}$) до проміжної температури (зазвичай $30\text{--}40^{\circ}\text{C}$), а другий завершує підігрів до робочої температури ($55\text{--}60^{\circ}\text{C}$), що відповідає санітарним нормам.

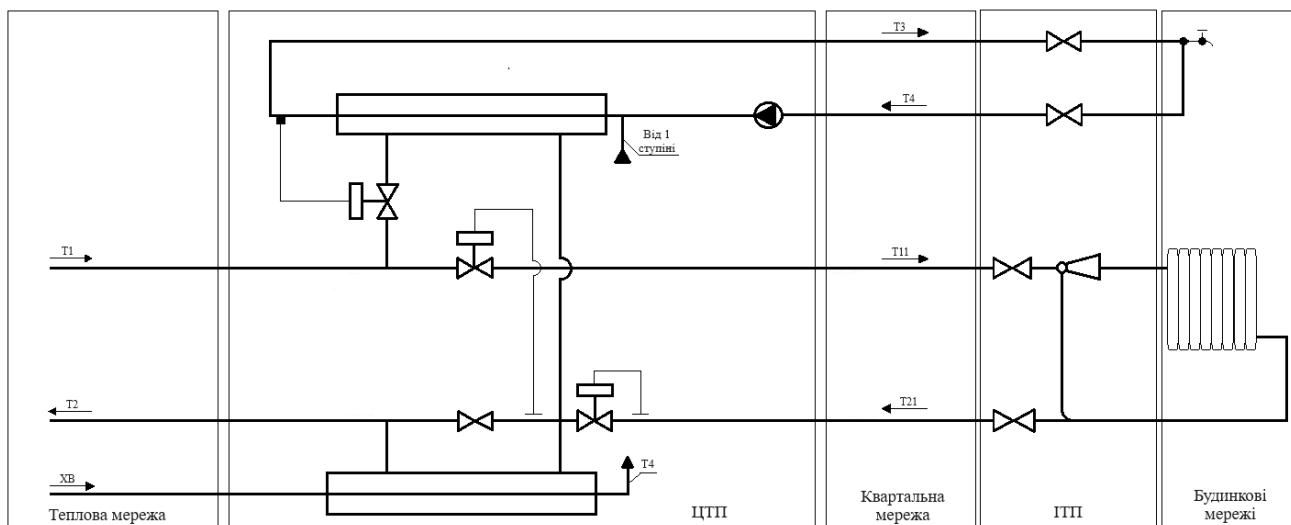


Рис.1.3 Принципова чотиритрубна схема ЦТП з залежним приєднанням системи опалення підключених будівель

2. Незалежне приєднання системи опалення та двоступенева схема ГВП (Рис. 1.4):

- Використовується для висотних будівель (більше 9 поверхів, $>30\text{ м}$);
- Теплообмінники для системи опалення розміщуються в приміщенні ЦТП, що дозволяє уникнути надлишкових тисків у будівельних мережах;

- Така схема дозволяє гнучко регулювати теплові потоки, проте збільшує загальні теплові втрати через додатковий рівень теплообміну.

Система опалення: Незалежне приєднання реалізується через експлуатацію теплообмінників (здебільшого кожухотрубних) у ЦТП, які забезпечують гідравлічне відокремлення первинного контуру (магістральної мережі) від вторинного контуру (внутрішньої системи опалення будівлі та або їх групи). Первинний контур зазвичай працює з високими параметрами — температурою до 120–150°C і тиском до 10–16 бар, тоді як вторинний контур підтримує нижчі температури (70–90°C) і тиск, адаптований до умов висотної будівлі (зазвичай до 6–10 бар).

Система ГВП: Двоступенева схема ГВП у ЦТП передбачає використання двох послідовно підключених теплообмінників: перший підігріває холодну воду з водопроводу (температура 5–15°C) до проміжної температури (зазвичай 30–40°C), а другий завершує підігрів до робочої температури (55–60°C), що відповідає санітарним нормам.

Залежно від конфігурації мереж, у складі ЦТП також могли бути теплообмінники для систем вентиляції (при підключенні адміністративних будівель) та окремі зони опалення для будівель понад 60 м висотою.

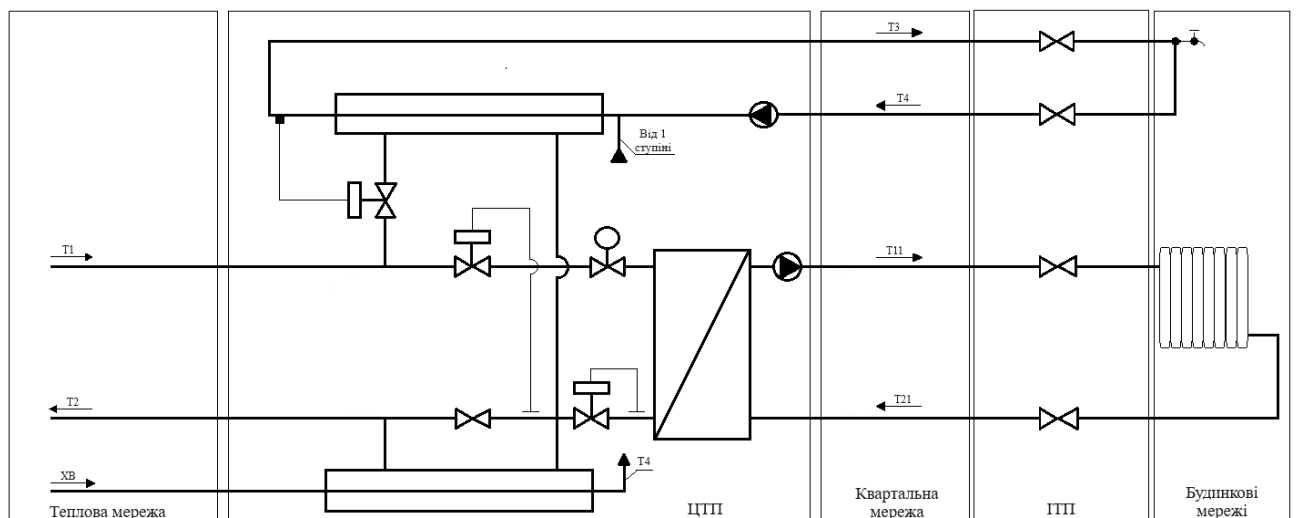


Рис.1.4 Принципова чотиритрубна схема ЦТП з незалежним приєднанням системи опалення підключених будівель

Незважаючи на переваги таких систем, ЦТП мали суттєві недоліки, що в довгостроковій перспективі стали причиною їх поступової заміни на ІТП. Основні проблеми:

- Високі втрати тепла у квартальних мережах – багатотрубні системи з додатковими теплообмінниками ГВП суттєво знижували загальну ефективність;
- Проблеми з регулюванням тепlopостачання – через транспортне запізнювання теплоносія абоненти, розташовані на різній відстані від ЦТП, отримували його з різною температурою. Це також негативно впливало на стабільність температури ГВП;
- Значні обсяги робіт при реконструкції – модернізація квартальних мереж вимагала масштабної заміни трубопроводів, арматури, теплоізоляції та супроводжувалася високими витратами;
- Високі експлуатаційні витрати – балансування та обслуговування великих ЦТП вимагало залучення висококваліфікованого персоналу;
- Обмеження при переході до низькотемпературних мереж – традиційні теплообмінники (зазвичай кожухотрубні) створювали бар'єри при переході до низькотемпературних систем 4ПЦТ.
- Дублювання систем регулювання – у сучасних системах 3-го покоління ЦТП та ІТП виконують подібні функції, що знижує ефективність і призводить до надлишкового енергоспоживання.

У 3ПЦТ центральні теплові пункти припинили використовуватися, оскільки із розвитком автоматизованих ІТП не було необхідності у проміжних пунктах регулювання. Всі функції ЦТП перейшли до ІТП, що дозволило оптимізувати розподіл тепла, знизити витрати енергії та забезпечити облік споживання.

Проте у великих системах залишалася потреба у гідравлічному зонуванні, через що замість ЦТП почали впроваджувати розподільчі теплові пункти (РТП). Вони виконували такі функції:

- Оптимізація гідравлічного режиму – відокремлення високотемпературних магістралей від низькотемпературних районних мереж;
- Підключення нових джерел тепла (відновлюваних джерел, когенерації, скидного тепла);
- Підключення модернізованих будівель із різними робочими профілями.

У 4ПЦТ відбувається подальше скорочення кількості РТП, що зумовлено розвитком технологій керування тепловими потоками, вдосконаленням гідравлічної структури мереж та зниженням робочих температур. Водночас, на їхній базі також можуть бути реалізовані двонаправлені теплові пункти, які сприятимуть інтеграції відновлюваних джерел тепла на рівні теплового району, забезпечуючи гнучке балансування потоків теплової енергії в розподільчих мережах.

Таким чином, модернізація ЦТП є недоцільною, оскільки їх функціонал повністю замінюється автоматизованими ІТП та РТП. У майбутньому розвиток інтелектуальних рішень як на рівні теплових районів (розподілу), так і окремих будівель, включаючи інтеграцію локальних ВДЕ та впровадження моделі просьюмера для окремих споживачів, сприятиме подальшій оптимізації системи ЦТ та зниженню її енергетичних втрат.

1.2.2. Розподільчі теплові пункти

З появою компактних вузлів регулювання та інноваційних ІТП традиційна концепція ЦТП поступово втрачає свою актуальність, особливо в контексті розвитку ЦТ третього та четвертого поколінь. Основні недоліки ЦТП, такі як значні теплові втрати в кожухотрубних теплообмінниках (наприклад, перша та друга ступені підігріву гарячого водопостачання і теплообмінники опалення), а також втрати води через інтенсивну корозію, особливо в квартальних мережах гарячого водопостачання, стимулювали перегляд архітектури теплових пунктів на рівні мереж.

Нова концепція передбачала перенесення систем регулювання ближче до кінцевого споживача з метою мінімізації кількості проміжних теплових пунктів на рівні магістральних і розподільних мереж. Проте в масштабних системах ЦТ зберігається потреба в спеціалізованих вузлах, які оптимізують гідравлічні та температурні параметри теплоносія для забезпечення стабільної роботи ІТП. Такі вузли, про які вже згадано вище, відомі РТП, виконують роль буферних систем, які розподіляють теплоносії з оптимальними параметрами в межах теплового району, забезпечуючи ефективність і надійність роботи всієї системи.

Основні функції РТП

РТП вирішують низку ключових завдань, зокрема:

- Підключення нових джерел тепла до існуючої інфраструктури без порушення її роботи;
- Інтеграція нових теплових мереж або розширення існуючих шляхом підключення до більш ефективних джерел тепла, а також поетапний запуск потужностей джерел без впливу на вже діючі системи чи розподільні мережі;
- Зонування мереж із різними робочими параметрами (наприклад, тиску та температури), що дозволяє адаптувати систему до умов модернізованих будівель із нижчими температурами в одній зоні порівняно з іншою, де будівлі не модернізовано;
- Захист інвестицій і зниження витрат на розгортання районних мереж. Наприклад, у магістральних трубопроводах із високим робочим тиском (до 25 бар) РТП забезпечують гідравлічне відокремлення, знижуючи аварійність і дозволяючи використовувати запірно-регулювальну арматуру з нижчими номінальними тисками (наприклад, 16 бар) у межах теплового району.

Класичним прикладом може слугувати типова схема РТП, яка використовує вискоєфективні пластинчаті теплообмінники для забезпечення гідравлічного поділу між первинною магістральною мережею від джерела тепла та вторинною мережею теплового району, до якої приєднані будівлі через ІТП (Рис. 1.5). Така схема є репрезентативною завдяки здатності пластинчатих теплообмінників мінімізувати теплові втрати, забезпечувати гнучке

регулювання та адаптуватися до низькотемпературних систем, характерних для 4ПЦТ.

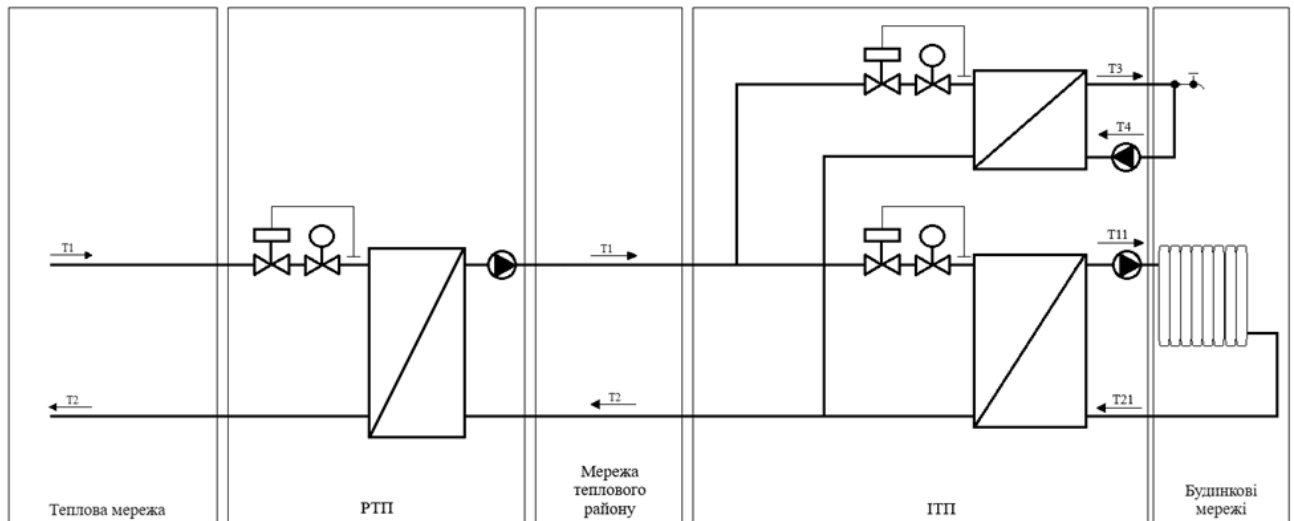


Рис.1.5 Класична схема РТП для приєднання теплових районів в великих системах ЦТ
Роль РТП у розвитку низькотемпературних систем

У зв'язку з поступовим зниженням температур у мережах, характерним для переходу від другого до третього та четвертого поколінь ЦТ, РТП відіграють важливу роль у підтримці низькотемпературних і наднизькотемпературних систем. Зокрема, вони сприяють зниженню температури в межах теплового району за допомогою спеціалізованих вузлів змішування (див. Рис. 1.6). Це дозволяє створювати в одній системі ЦТ кілька зон із різними температурними рівнями, що відповідає концепції поступового переходу до систем четвертого покоління.

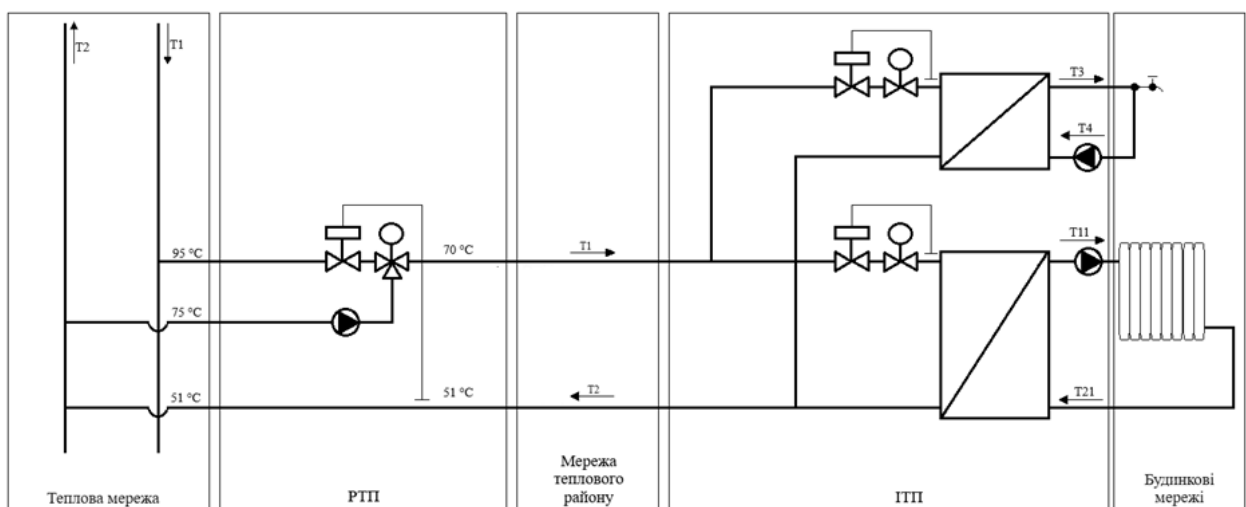


Рис. 1.6 Принципова схема РТП з вузлом змішування для зниження температур в окремих теплових районах існуючої системи ЦТ

Особливу увагу приділено РТП, орієнтованим на розширення мереж (див. Рис. 1.7). Зростання частки ЦТ, спричинене появою нових, економічно вигідних джерел теплової енергії та залученням нових споживачів, робить такі РТП стратегічно важливими. Наприклад, у таких системах використовується каскад паралельно підключених теплообмінників, кількість яких визначається технічними вимогами, а також два регулювальні клапани, один із яких є пілотним. Пілотний клапан забезпечує до 30% витрат для одного теплообмінника, а при підвищенні попиту відкривається основний клапан, дозволяючи поступово збільшувати потужність системи. Це особливо актуально для великих житлових комплексів, де введення об'єктів в експлуатацію може відбуватися впродовж місяців або років.

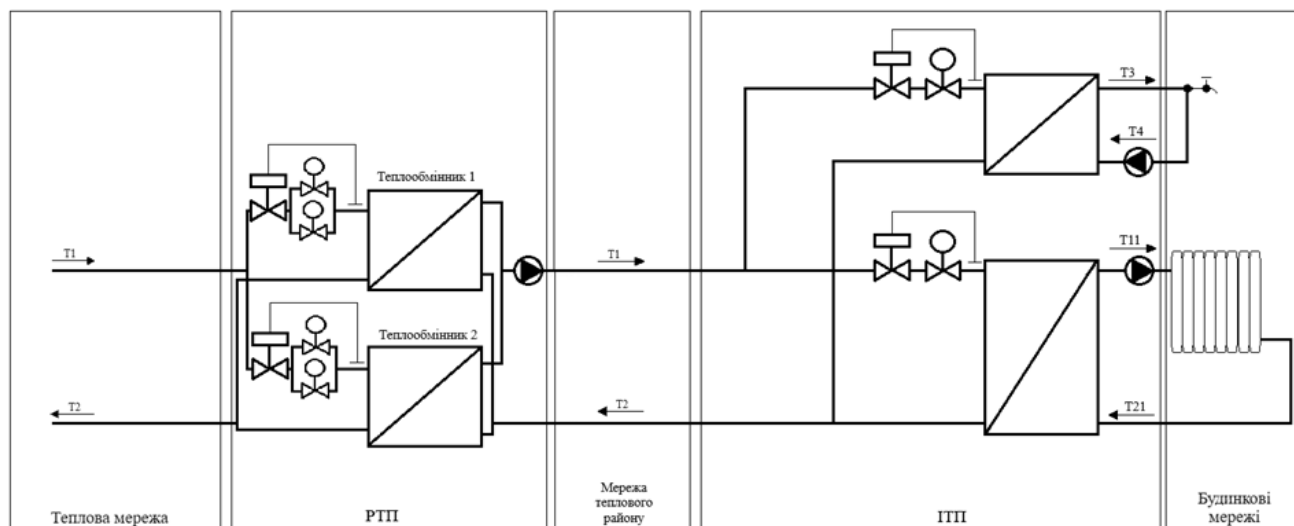


Рис.1.7 Принципова схема РТП з каскадом паралельно включених теплообмінників, основним та пілотним регулювальними клапанами

Ефективність і перспективи РТП

Використання попередньо ізольованих трубопроводів із спініним поліуретаном у двотрубних мережах теплових районів після РТП значно знижує теплові втрати порівняно з багатотрубними мережами, характерними для ЦТП на рівні кварталів або груп будівель. Сучасні вискоелективні теплообмінники відкривають перспективи для переходу до систем із ще нижчими температурами [8]. Оптимізація гідравлічних режимів, зменшення втрат тиску та витрат у мережах дозволяє знизити як капітальні витрати на інфраструктуру, так і

експлуатаційні витрати, зокрема на електроенергію для циркуляційних насосів [9].

Незважаючи на ці переваги, розвиток низькотемпературних і наднизькотемпературних систем ЦТ підкреслює необхідність скорочення кількості проміжних (мережевих) теплових пунктів, якщо це технічно можливо, щоб уникнути додаткових теплових втрат. Однак заміна або модернізація застарілих ЦТП на РТП або ІТП є більш доцільною стратегією, ніж спроби модернізувати самі ЦТП, які належать до технологій другого покоління централізованого теплопостачання. ЦТП, із їхньою архітектурою та високими втратами, не відповідають сучасним вимогам енергоефективності та гнучкості, особливо в умовах інтеграції 2Н-ІТП, які дозволяють споживачам продавати надлишки теплової енергії назад у систему.

Таким чином, РТП стають ключовим елементом переходу до систем четвертого покоління, забезпечуючи гнучкість, енергоефективність і готовність до інтеграції нових технологій, таких як відновлювані джерела енергії та системи зворотного енергопостачання від споживачів.

1.2.3 Покоління теплових пунктів та огляд літератури

Перше покоління

Перша комерційно успішна система централізованого теплопостачання (ЦТ) була створена в Локпорті, штат Нью-Йорк, у 1877 році винахідником Бердсіллом Холлі [10]. Цей проєкт мав величезне значення, адже Холлі не лише реалізував першу комерційну систему ЦТ (яка через 10 років діяла вже в 20 американських містах), але й розв'язав низку складних інженерних завдань, пов'язаних із виробництвом, транспортуванням і розподілом тепла в будівлях.

У парових системах ЦТ першого покоління (1ПЦТ) регулювання подачі тепла адаптувалося до попиту шляхом контролю якості пари безпосередньо в джерелі тепла. Через високу температуру пари (зазвичай 150–200°C) та значне температурне розширення трубопроводів системи оснащувалися

компенсаторами для запобігання деформації та пошкодження інфраструктури. Опалювальні установки в будівлях склалися з парових калориферів для вентиляційних систем, атмосферних радіаторів і акумуляторів гарячої води, які забезпечували базове тепlopостачання для опалення, вентиляції та ГВП [11].

У рамках цього покоління були визначені два ключові винаходи, які заклали основу для подальшого розвитку індивідуальних теплових пунктів (ІТП) і стали прообразом сучасних систем регулювання. Найважливішими стали регулятор тиску пари (патент № 246,952 від 13 вересня 1881 р.) та пристрій для вимірювання споживання пари (патент № 241,217 від 10 травня 1881 р.), які дозволили вперше реалізувати базові функції контролю, обліку та зниження тиску в системах теплоспоживання [12, 13]. На той час теплові пункти на рівні розподілу в парових системах ЦТ були відсутні, оскільки вся регуляція відбувалася безпосередньо в джерелі тепла або на рівні окремої будівлі.

На Рис. 1.8 наведено загальну схему теплового пункту 1ПЦТ, яка ілюструє типову парову систему для підключення до однієї будівлі. Схема включає:

Безнакопичувальний калорифер або кожухотрубний теплообмінник (Non-storage calorifier) — основний теплообмінний елемент, що передає тепло від пари до води або повітря для опалення, вентиляції чи ГВП. На схемі показано кожухотрубний теплообмінник, де пар поступає з магістральної мережі, нагріваючи холодну воду.

Паровий конденсатовідвідник (Steam trapping station) — пристрій для видалення конденсату, який утворюється внаслідок охолодження пари в калорифері або теплообміннику, і підтримки стабільного тиску в системі. Схема показує два конденсатовідвідники, що відводять конденсат із системи, мінімізуючи втрати тепла та запобігаючи порушення гідравлічного режиму.

Регулювальні клапани, які забезпечують контроль тиску та температури пари, що надходить із джерела тепла, а також трубопроводи, що транспортують пар і конденсат у системі.

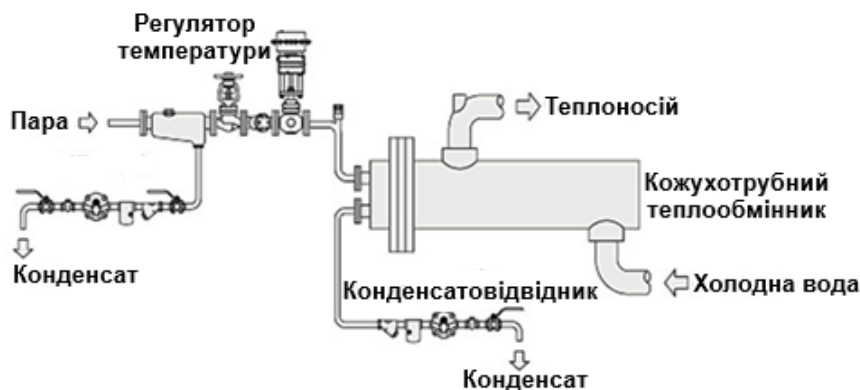


Рис.1.8 Принципова схема с кожухотрубним теплообмінником в ІТП першого покоління [14]

Ця схема відображає просту, але ефективну на той час конструкцію, яка базувалася на прямій дії пари без складних систем гідравлічного розподілу. Вона підкреслює обмеження першого покоління теплових пунктів, зокрема їхню залежність від високотемпературних режимів, використання регуляторів температури прямої дії та відсутність сучасних систем автоматизації. Це призводило до низької гнучкості регулювання, обмеженого контролю параметрів теплоносія та зниження загальної енергетичної ефективності системи.

У Таблиці 2 представлено ключові характеристики теплових пунктів 1ПЦТ, що включають типові параметри температури пари та застосовані ключові елементи.

Таблица 2. Основні відмінні риси теплових пунктів першого покоління.

Рівень теплового пункту	Темп-ий графік первинного контуру	Тип приєднання	Темп-ий графік вторинного контуру	Тип теплообмінника	Вимірювання енергії	Тип обмеження витрати	Регулювання теплового потоку	Тип циркуляції теплоносія
Розподільчі або мережеві	-	-	-	-	-	-	-	-
На рівні будівлі	< 200 °C	Незалежне	< 105 °C	Кожухотрубний (конвертер)	Конденсатомір	Відсутній	Регулятор температури прямої дії з регулятором тиску пари	Природна

Таким чином, теплові пункти першого покоління являли собою компоненти парових систем ЦТ, призначені для підключення систем опалення, вентиляції, ГВП і технологічних установок окремих будівель. Вони могли

включати регулювальні клапани прямої дії (для зниження тиску й температури пари), кожухотрубні теплообмінники, а також конденсатовідвідники та конденсатоміри.

Друге покоління

Друге покоління теплових пунктів характеризується відносною однорідністю щодо джерел енергії, переважно на основі викопного палива (природний газ, вугілля, нафта), що використовувалися в котельнях або теплових електростанціях для виробництва високотемпературного теплоносія, розподіленого через теплові мережі у двотрубному виконанні, але вирізняється значною кількістю застосовуваних схем і, в деяких аспектах, їхньою складністю. На відміну від першого покоління, де теплові пункти обмежувалися індивідуальними рішеннями (першими ІТП) на рівні окремих будівель у парових системах, друге покоління охоплює як ІТП, так і ЦТП на рівні мереж та розподілу, які були розглянуті раніше в цьому розділі. Це покоління, в порівнянні з першим, стало одним з найбільш продуктивних за обсягом наукової літератури та тематичних досліджень, що відображає його ключову роль у розвитку ЦТ у середині ХХ століття.

Ключові винаходи та технології. Однією з визначальних інновацій, що суттєво вплинули на розвиток теплових пунктів другого покоління, став гідроелеватор. Перший відомий патент на систему опалення з гідроелеватором був опублікований у 1942 році з заявкою, поданою в 1937 році під назвою «Система центрального водяного отоплення» [15]. Детальний опис систем із гідроелеваторами та кожухотрубними теплообмінниками, разом із принциповими схемами, подано в звіті «The National District Heating Association» 1967 року [16]. Цей звіт охоплює типові конфігурації другого покоління — від джерел тепла до систем регулювання на рівні мереж і окремих будівель.

Хоча гідроелеватори з'явилися на схемах ще в 1937 році, а кожухотрубні теплообмінники використовувалися в ІТП першого покоління, подальші патенти на ці технології датуються пізнішими роками. Наприклад, патент на

гідроелеваторний вузол, поданий у 1971 році та опублікований у 1974 році під назвою «Элеваторный узел системы центрального отопления», належить А. В. Мазо, Ю. С. Сударікову та І. В. Озерову з Державного проектного інституту «Сантехпроект» [17]. Інші подібні патенти, такі як «Закрытая водяная система централизованного теплоснабжения» (1984), «Элеваторный узел» (1985) та «Элеваторная система отопления» (1986), також відображають еволюцію цієї технології [18–20]. Що стосується кожухотрубних теплообмінників, які масово застосовувалися в ЦТП другого покоління, їхній патент був поданий у 1974 році та опублікований у 1977 році [21].

Наукові напрацювання та практичне впровадження. Пік наукових досліджень і навчально-методичної літератури про тепловим пунктам другого покоління припадає на період із середини 1960-х до початку 2000-х років. Цей етап вирізняється не лише теоретичними розробками, але й масовим практичним впровадженням теплових пунктів, а також серійним виробництвом ключових компонентів: теплообмінників, регуляторів прямої дії, перших електронних регуляторів (контролерів) для керування інженерними системами будівель, підключених до теплових мереж.

Радянська наукова література цього періоду вважалася однією з найпрогресивніших у світовому контексті розвитку систем ЦТ. Значний внесок зробили такі дослідники, як Е. А. Белинский, В. К. Дюскін, В. І. Ливчак, Н. Н. Чистяков, А. П. Сафонов, В. П. Туркін, В. С. Фаликов, С. А. Чистович, Н. М. Зінгер, В. Г. Бестолченко, А. А. Жидков, Г. М. Захаров, І. В. Беляйкін, В. П. Вітальєв, Н. К. Громов, В. Н. Богословський, В. П. Щеглов, Н. Н. Разумов, Е. Я. Соколов, Ю. В. Кононович, А. В. Извеков, А. С. Буличев, С. А. Чистович, В. І. Паніна та інші [22–39]. Їхні праці охоплювали схеми регулювання, компоненти теплових пунктів, проблеми впровадження систем регулювання та автоматизації на початковому рівні, а також експериментальні дослідження впливу автоматизації на сталість гідравлічних і температурних режимів у системах ЦТ. Крім того, розглядалися теплотехнічні характеристики будівель, які необхідно враховувати при виборі інженерних рішень. Літературні джерела цього періоду

комплексно описували системи ЦТ — від джерел тепла до принципів побудови мереж і абонентських вводів (одна з розповсюджених назв ІТП того періоду).

Способи приєднання систем внутрішнього теплоспоживання будівель. У другому поколінні теплових пунктів сформувалися ключові способи приєднання систем теплоспоживання окремих будівель або їхніх груп до теплових мереж:

Системи опалення та вентиляції:

Залежне приєднання: Найпоширенішим стало використання гідроелеваторів (пізніше — регульованих гідроелеваторів із погодозалежною автоматикою та насосною циркуляцією) або безпосереднього приєднання без змішування. Це забезпечувало простоту конструкції, мінімальну кількість компонентів, низьку вартість і швидке встановлення, що відповідало високим темпам будівництва в цей період.

Незалежне приєднання: Застосовувалися кожухотрубні, а згодом — пластинчаті розбірні теплообмінники, хоча ця схема була менш поширеною через складність, габаритність і шум насосного обладнання.

Системи гарячого водопостачання (ГВП). Використовувалися різні схеми, такі як паралельне (одноступеневе), змішане чи послідовне (двоступеневе) підключення теплообмінників, а також відкрита схема з безпосереднім відбором гарячої води з теплової мережі. Вибір схеми залежав від співвідношення максимальних навантажень ГВП (Q_{dhw}) і опалення (Q_h), що визначало технічні та економічні параметри системи.

Типові схеми приєднання. На Рис. 1.9 наведено класичну схему залежного приєднання системи опалення, вентиляції та технологічних систем із використанням гідроелеватора.

Така схема застосовувалася, коли температура в подавальному трубопроводі теплової мережі (Т1) перевищувала розрахункову температуру в системі теплоспоживання.

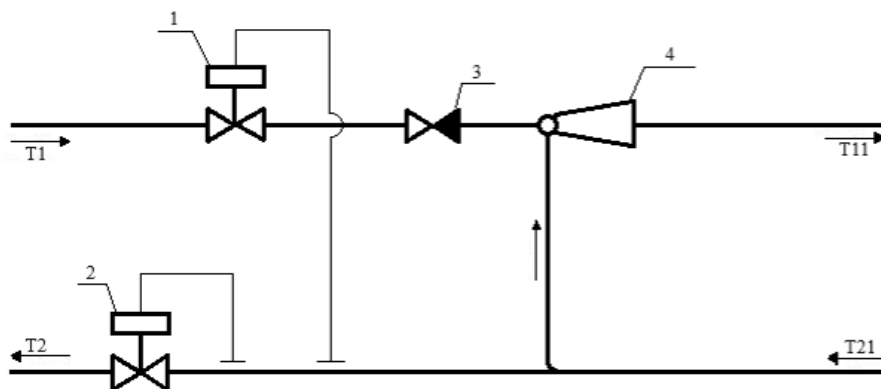


Рис.1.9 Принципова схема приєднання з гідроелеватором ТП другого покоління.

1 – регулятор перепаду тиску або дросельна шайба, 2 – регулятор тиску «до себе» (у випадках, коли тиск в зворотному трубопроводі нижче за статичний), 3 – зворотний клапан, 4 – гідроелеватор (складається з сопла, камери змішування та дифузора). T1 – подавальний трубопровід теплової мережі, T2 – зворотний трубопровід теплової мережі, T11 – подавальний трубопровід системи теплоспоживання, T21 – зворотний трубопровід системи теплоспоживання.

Регулятори тиску прямої дії (позиції 1 і 2 на Рис. 1.9) використовувалися обмежено, оскільки для зниження надлишкового тиску та обмеження витрати частіше застосовувалися неавтоматичні засоби, такі як дросельна шайба (Рис. 1.10).

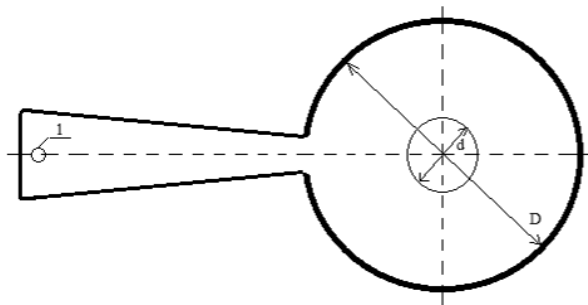


Рис.1.10 Дросельна шайба (діафрагма).

d – внутрішній діаметр отвору для дроселювання надлишкового напору, D – зовнішній діаметр для монтажу в міжфланцевий простір, 1 – отвір для опломбування після встановлення.

Дросельна шайба (діафрагма) призначалася для дроселювання надлишкового напору в системах із постійним гідравлічним режимом, забезпечуючи гідравлічне балансування та обмеження максимальної витрати в розподільчих мережах, ЦТП і неавтоматизованих вузлах, зокрема в гідроелеваторах. Основним недоліком було потреба в постійному обслуговуванні та заміні, оскільки отвір (d) з часом розширювався під впливом

поток теплоносителя, что приводило до превышения витраты, необходимой для системы. Відсутність систем обліку та своєчасного виявлення невідповідних параметрів суттєво знижувала ефективність системи ЦТ.

Перехідні схеми до третього покоління. Деякі схеми приєднання стали перехідними між другим і третьом поколіннями теплових пунктів. Вони поєднували використання гідроелеватора з інноваціями того періоду, такими як регулювальний клапан з електроприводом або регульоване сопло в конструкції гідроелеватора (Рис. 1.11).

Ці системи вже дозволяли регулювання температури теплоносителя в системі опалення будівлі залежно від температури зовнішнього повітря або відхилення температури всередині приміщення. У окремих випадках застосовувалася насосна циркуляція в системі опалення.

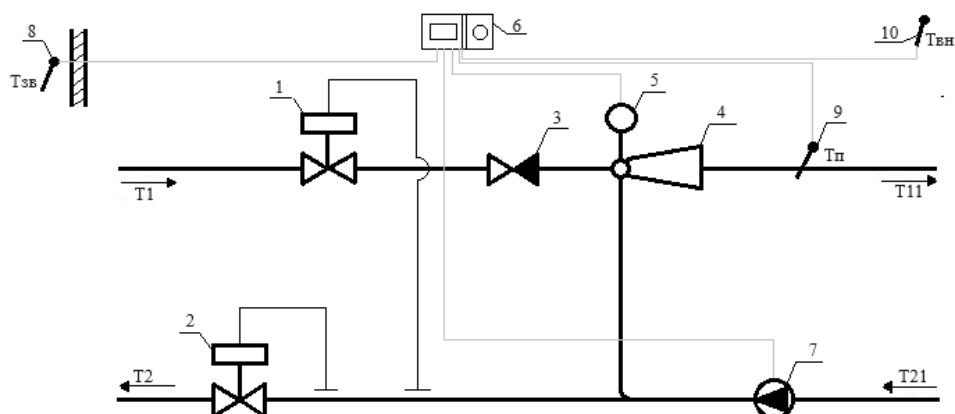


Рис.1.11 Принципова автоматизована схема приєднання з гідроелеватором ТП другого покоління.

1 – регулятор перепаду тиску або дросельна шайба, 2 – регулятор тиску «до себе» (у випадках, коли тиск в зворотному трубопроводі нижче за статичний), 3 – зворотний клапан, 4 – гідроелеватор (складається з сопла, камери змішування та дифузора), 5 – регулювальний клапан з електроприводом або регульоване сопло, 6 – контролер, 7 – циркуляційний насос, 8 – датчик температури зовнішнього повітря, 9 – датчик температури води в системі опалення, 10 – датчик температури повітря в середині приміщення.

Обмеження гідроелеватора. Незважаючи на широку популярність, у третьому поколінні теплових пунктів гідроелеватор втратив своє значення через низку недоліків. Основним є його робота в умовах постійного гідравлічного режиму, що суперечить перемінним гідравлічним режимам, створюваним терморегуляторами в двотрубних системах, а в однострубних — призводить до

значних коливань тиску та погіршення роботи системи опалення. Крім того, гідростатичний коефіцієнт корисної дії (ККД) гідроелеватора становить лише близько 10%, а для забезпечення працездатності системи часто потрібно значний перепад тиску в первинному контурі.

Інші схеми приєднання. Найпростішою, але менш поширеною альтернативою залежному приєднанню за допомогою гідроелеватора була безпосередня схема приєднання (Рис. 1.12).

У цій схемі вода з теплової мережі подавалася безпосередньо в систему опалення або технологічну установку, зазвичай не використовуючись для вентиляційних систем через потребу в змішуванні та регулюванні температури. Ця схема застосовувалася, коли розрахункові параметри теплової мережі збігалися з параметрами системи опалення або технологічної установки, наприклад, при теплопостачанні від котелень із чавунними котлами (максимальна температура 95–105°C) або після ЦТП із насосною циркуляцією. З часом до цієї схеми додавалися змішувальна перемичка з циркуляційним насосом на подавальному, зворотному трубопроводах, а також система погодозалежного регулювання, що вказувало на перехід до ТП третього покоління.

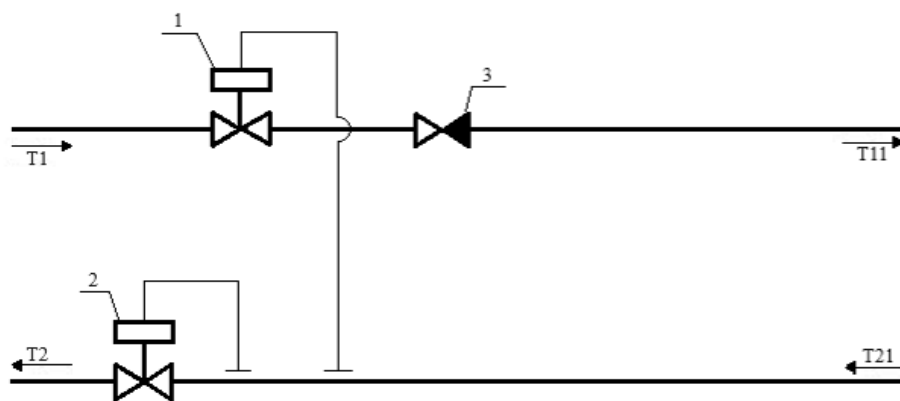


Рис.1.12 Безпосередня схема приєднання (без змішування).

1 – регулятор перепаду тиску або дросельна шайба, 2 – регулятор тиску «до себе» (у випадках, коли тиск в зворотному трубопроводі нижче за статичний), 3 – зворотній клапан. T1 – подавальний трубопровід теплової мережі, T2 – зворотний трубопровід теплової мережі, T11 – подавальний трубопровід системи теплоспоживання, T21 – зворотний трубопровід системи теплоспоживання.

Незалежне приєднання, хоча й було менш поширеним, використовувалося з кожухотрубними, а згодом — пластинчастими теплообмінниками. Обмеження включали шум насосного обладнання та габарити теплообмінників, що ускладнювало їхнє застосування безпосередньо в будівлях. Такі схеми часто застосовувались на рівні ЦТП, що відображено в розділі 1.2.1 «Центральні теплові пункти».

У цьому розділі не описуються малопоширені або дослідні схеми, такі як система ступеневої регенерації теплоти (СРТ) із тонкостінними теплообмінними апаратами інтенсифікованими (ТТАІ) або системи пофасадного регулювання.

Системи гарячого водопостачання (ГВП). На відміну від схем приєднання опалення та вентиляції, вибір схем для ГВП був значно складнішим, а самі системи — більш громіздкими та металовмісними. Визначальним критерієм для вибору схеми приєднання теплообмінників ГВП у закритих системах ЦТ було співвідношення максимальних навантажень ГВП (Q_{dhw}) і опалення (Q_h). Основні співвідношення впливали на конструкцію таким чином:

1. $\frac{Q_{dhw}}{Q_h} \leq 0,2$ (Рис. 1.13, Рис. 1.10):

застосовувалися одноступеневі схеми: передвключена (Рис. 1.13) або паралельне підключення теплообмінника (Рис. 1.10).

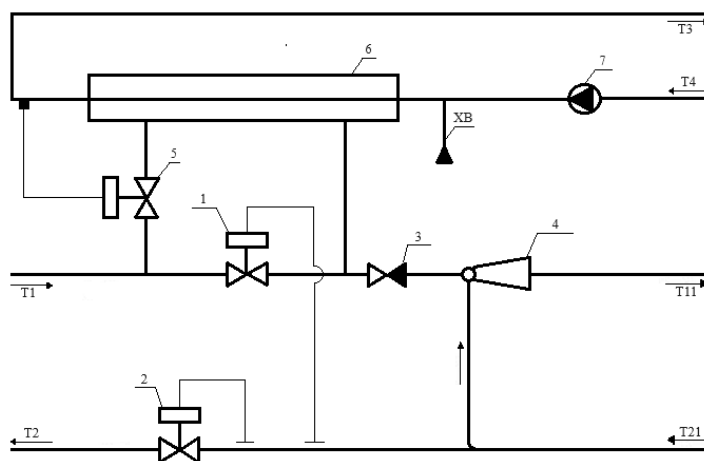


Рис.1.13 Принципова схема приєднання з гідроелеватором та передвключеною схемою ГВП ТП другого покоління.

1 – регулятор перепаду тиску або дросельна шайба, 2 – регулятор тиску «до себе» (у випадках, коли тиск в зворотному трубопроводі нижче за статичний), 3 – зворотній клапан, 4 – гідроелеватор (складається з сопла, камери змішування та дифузора), 5 – регулятор температури прямої дії, 6 – теплообмінник (як правило кожухотрубний), 7 – насос рециркуляції ГВП. T3 – в систему ГВП, T4 – циркуляційний трубопровід, ХВ – холодне водопостачання.

Ці схеми використовувалися в будівлях із низьким навантаженням ГВП. Передвключена схема мала особливість: у пікові години водозбору в систему опалення надходив теплоносій із нижчою температурою, використовуючи енергію, накопичену будівлею. Налаштування регуляторів прямої дії (температури для ГВП і витрати для опалення) було складним через низький рівень автоматизації та необхідність врахування акумуляційної здатності будівлі.

2. $0,2 < \frac{Q_{dhw}}{Q_h} < 1,2$ (Рис. 1.14, А і Б):

використовувалися двоступеневі схеми: послідовна (два теплообмінники підключені послідовно до подавального та зворотного трубопроводів, Рис. 1.14, А) або змішана (один теплообмінник послідовно до зворотного, інший — паралельно, Рис. 1.14, Б).

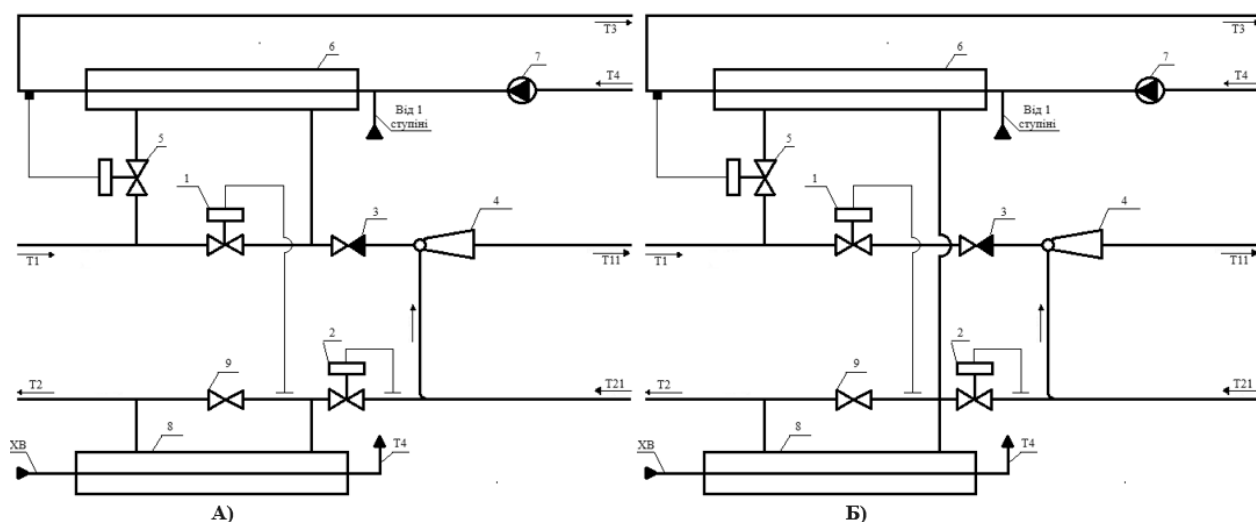


Рис.1.14 А) Принципова схема приєднання з гідроелеватором та двоступеневою послідовною схемою ГВП ТП другого покоління.

Б) Принципова схема приєднання з гідроелеватором та двоступеневою змішаною схемою ГВП ТП другого покоління.

1 – регулятор перепаду тиску або дросельна шайба, 2 – регулятор тиску «до себе» (у випадках, коли тиск в зворотному трубопроводі нижче за статичний), 3 – зворотний клапан, 4 – гідроелеватор (складається з сопла, камери змішування та дифузора), 5 – регулятор температури прямої дії, 6 – теплообмінник 2-ступіні, 7 – насос рециркуляції ГВП, 8- теплообмінник 1-ступіні, 9-засувка, при закритті якої зворотна вода з системи опалення проходить через теплообмінник 1-ступіні. ТЗ – в систему ГВП, Т4 – циркуляційний трубопровід, ХВ – холодне водопостачання.

Ці схеми були складними в проектуванні та експлуатації, а також дороговартісними через використання двох теплообмінників (згодом замінених

моноблочними з внутрішніми каналами). Вони дозволяли знизити температуру в зворотному трубопроводі на 3–5°C і зменшити загальну витрату теплоносія на 6–15%, що було важливим для нерегульованих систем опалення та вентиляції. Такі схеми застосовувалися для багатоквартирних житлових будинків і промислових підприємств, де теплообмінники зазвичай розташовувалися в ЦТП через їхні великі габарити.

$$3. \frac{Q_{dhw}}{Q_h} > 1,2 \text{ (Рис. 1.15):}$$

використовувалася лише одноступенева паралельна схема приєднання (Рис. 1.15).

У цьому випадку витрата мережної води складалася з максимальних значень для кожної підключеної системи, не впливаючи на їхню взаємодію.

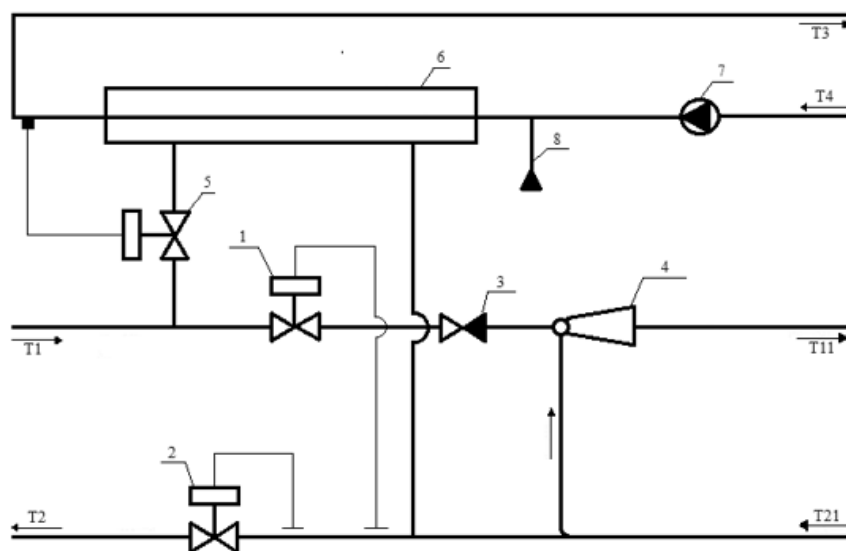


Рис.15 Принципова схема приєднання з гідроелеватором та паралельною схемою ГВП ТП другого покоління.

1 – регулятор перепаду тиску або дросельна шайба, 2 – регулятор тиску «до себе» (у випадках, коли тиск в зворотному трубопроводі нижче за статичний), 3 – зворотний клапан, 4 – гідроелеватор (складається з сопла, камери змішування та дифузора), 5 – регулятор температури прямої дії, 6 – теплообмінник (як правило кожухотрубний), 7 – насос рециркуляції ГВП. T3 – в систему ГВП, T4 – циркуляційний трубовід, ХВ – холодне водопостачання.

У третьому поколінні паралельна схема стала стандартом для всіх типів систем із будь-яким діапазоном навантаження завдяки розвитку автоматизації – в першу чергу функції пріоритету ГВП та можливостям обмеження температури зворотного теплоносія за допомогою електронних систем керування. Однак на початку розвитку автоматизованих теплових пунктів другого покоління

паралельне приєднання могло спричиняти неорганізований перерозподіл теплоносія між системами через використання неавтоматичних засобів, таких як дросельні шайби та регулятори температури прямої дії. Останні не призначалися для первинного балансування теплової мережі а лише підтримували встановлену температуру гарячої води. Це призводило до гідравлічного розбалансування, особливо в системах із великим діапазоном витрат.

Відкриті системи ГВП. Відкриті системи ГВП (Рис. 1.16) не були широко поширені й застосовувалися в мережах із високою якістю води, наприклад, в системах ЦТ від атомних станцій.

Оснащення в таких системах було мінімальним і зазвичай обмежувалося три- або двоходовим регулятором температури прямої дії. Теплообмінне обладнання відсутнє, а відбір води здійснювався безпосередньо з теплової мережі. Циркуляційний трубопровід зазвичай був відсутній.

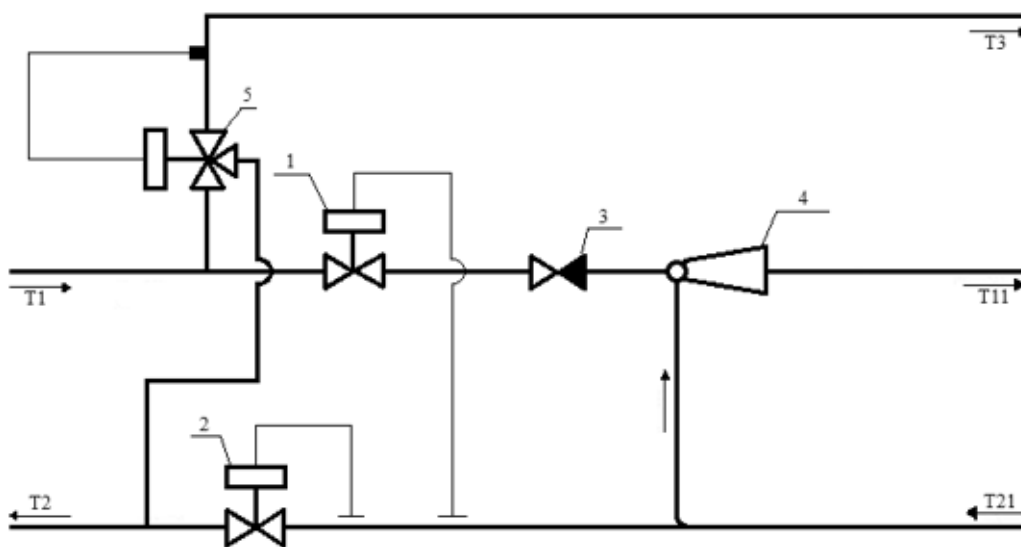


Рис.1.16 Принципова схема приєднання з гідроелеватором та відкритою схемою ГВП ТП другого покоління.

1 – регулятор перепаду тиску або дросельна шайба, 2 – регулятор тиску «до себе» (у випадках, коли тиск в зворотному трубопроводі нижче за статичний), 3 – зворотний клапан, 4 – гідроелеватор (складається з сопла, камери змішування та дифузора), 5 – триходовий регулятор температури прямої дії. T3 – в систему ГВП.

Основні відмінні риси теплових пунктів другого покоління наведено в Таблиці 3, яка відображає параметри первинного та вторинного контурів, типи приєднання, теплообмінників, обмеження витрат, регулювання теплового потоку та циркуляції теплоносія.

У Таблиці 3 представлено ключові характеристики теплових пунктів другого покоління, що є компонентами високотемпературних водяних систем ЦТ, призначені для підключення систем опалення, вентиляції, ГВП і технологічних установок як окремих будівель (через ІТП), так і груп будівель (через ЦТП).

Таблиця 3. Основні відмінні риси теплових пунктів другого покоління

Рівень теплового пункту	Темп-ий графік первинного контуру	Тип приєднання	Темп-ий графік вторинного контуру	Тип теплообмінника	Вимірювання енергії	Тип обмеження витрати	Регулювання теплового потоку	Тип циркуляції теплоносія
Розподільчі або мережеві	150-70 °C 130-70 °C	Залежне/Не залежне	105-70°C 95-70°C	Кожухотрубний	Механічний витратомір	Неавтоматичний	Регулятор прямої дії/автоматизована система	Насосна
На рівні будівлі	105-70 °C 95-70°C	Залежне/Не залежне	< 105 °C	Кожухотрубний	Механічний витратомір	Неавтоматичний	Відсутня/автоматизована система	Гідроелеватор/Насосна

Третє покоління

Третє покоління (ЗПЦТ) теплових пунктів є більш різноманітним у порівнянні з другим поколінням щодо джерел енергії, включаючи відновлювані джерела (наприклад, теплові насоси, сонячні колектори) поряд із традиційними (газові чи вугільні ТЕЦ і котельні), але водночас вирізняється стандартизованістю та впорядкованістю конструкцій самих теплових пунктів. Саме в третьому поколінні з'являються теплові пункти, які складаються з комплексу автоматичних пристроїв і обладнання, зокрема для точного регулювання гідравлічних і температурних параметрів. Ці технології часто називають скандинавськими, оскільки значна частина інновацій і виробників походить із країн Скандинавії, де вони були успішно випробувані та впроваджені, а згодом адаптовані в Західній Європі та поступово впроваджуються в Україні.

Наукові напрацювання та практичне впровадження. Література про теплові пункти третього покоління почала з'являтися після нафтової кризи 1973–1974 років, коли країни Скандинавії запустили низку ініціатив у секторі ЦТ для

зниження витрат споживачів. Зокрема, акцент робився на зменшенні робочих температур у системах ЦТ (з 150–70°C до 105–60°C або нижче в розподільчих мережах) та впровадженні якісно-кількісного регулювання для забезпечення економічної роботи систем виробництва й розподілу [40]. Однак більшість цих матеріалів містили лише загальні рекомендації та залишилися в паперовому вигляді. Серед ключових авторів варто відзначити S. Frederiksen, Werner S.E., Koskelainen L., Benny Bøhm, Eric J. Jeffs, Koskelainen L., R. Price, Rasmussen, C.H., Lund J.E. та інших [41–50].

На відміну від другого покоління, де теоретичні напрацювання тривалий час не переходили в практику, теплові пункти третього покоління швидко втілювалися в реальних системах. Значний внесок зробили компанії та асоціації, такі як Danfoss A/S та Finnish District Heating Association, які детально описали теорію ЦТ, розподілу тепла та конструкції теплових пунктів. Їхні роботи містили основні схематичні рішення систем регулювання, аналіз ключових елементів і їхнє застосування [51, 52]. Автори B. Skagestad, P. Mildenstein, P. Randløv детально досліджували системи регулювання для тепло- та холодопостачання, які на момент написання були найпрогресивнішими й залишаються актуальними досі. Їхні праці охоплюють системи централізованого тепло- та холодопостачання, основні компоненти теплових пунктів, зокрема ІТП, з найпоширенішими схемами підключення будівель [53, 54].

Глибший аналіз представлено в роботах Chris Snoek, Libing Yang, Tom Onno, Svend Frederiksen, Hans Korsman, де розглядається оптимальний дизайн ІТП для максимізації енергоефективності систем ЦТ. Основні відмінності третього покоління — низькі температури подачі та висока різниця температур між подачею та зворотною (ΔT). Система ЦТ моделювалась за допомогою математичної системи MATLAB і пакета Simulink® (в якості джерела тепла — газотурбінна ТЕЦ комбінованого циклу з піковими котлами, що працюють на природному газі), а робота систем опалення — протягом року. Результати показали, що ΔT можна збільшити за рахунок конфігурацій схем відповідно до типу під'єднаної системи та каскадного розподілу теплових навантажень, хоча

ефективність також різнилася залежно від типу будівель (великі багатофункціональні будівні (спортивні і фізкультурно-оздоровчі споруди), односімейні будинки, багатоквартирні житлові та невеликі офісні будівлі) [55].

В Україні також з'являється своя навчально-методична література. В першу чергу варто відмітити Пиркова В.В., в книгах якого зосереджений значний досвід напрацювань в системах регулювання та розкриваються глибокі теоретичні аспекти режимів роботи обладнання. Зокрема, він виявив недоліки гідроелеваторів, поширених у країнах Східної Європи, і запропонував оптимальні схематичні рішення для ІТП [56]. Для студентів вищих навчальних закладів створено навчальний посібник П. М. Єніна та Н. А. Швачко, який охоплює системи регулювання на всіх рівнях ЦТ — від ЦТП до ІТП [57]. Автори Любарець О.П., Зайцев О.М. і Любарець В.О. комплексно розглянули основи теплотехнічного розрахунку, тепловтрат, теплонадходжень і сучасні системи водяного опалення, приділяючи увагу тепловим пунктам на різних рівнях системи теплопостачання [58].

Крім того, ряд авторів, зокрема Jonas Gustafsson, Jerker Delsing, Jan van Deventer, Hakan İbrahim Tol, Svend Svendsen, Henrik Gadd, Sven Werner та міжнародна асоціація Euroheat & Power, зосередилися на комплексному підході, аналізі існуючих рішень і заходах для підвищення енергоефективності та зниження робочих температур [59–63]. Ці роботи не лише аналізують майбутній розвиток систем ЦТ, зокрема низькотемпературних, але й закладають основу для розвитку розумних енергетичних систем, де ІТП відіграють ключову роль, однак наявність певного дефіциту інформації про роботу та стан обладнання ІТП створює підґрунтя для подальшого розвитку цифрових інструментів для керування та моніторингу. У Західній Європі значну роль відіграла книга Svend Frederiksen і Sven Werner, де детально описано принципи побудови, елементи систем регулювання для тепло- та холодопостачання [64].

Ключові зміни в теплових пунктів третього покоління. Третє покоління характеризується такими інноваціями:

Серійне виробництво, менші габарити та металомісткість: Регулювальні клапани, теплообмінники, запірна арматура та насоси стали компактнішими, що знизило розміри теплових пунктів і їхню металомісткість.

Зниження рівня шуму: Зокрема, циркуляційні насоси стали значно тихішими, що дозволило розміщувати ІТП у технічних і підвальних приміщеннях навіть невеликих будівель.

Розвиток мікропроцесорних технологій: З'явилися комп'ютерне програмування, стандартизовані протоколи (наприклад, Modbus RTU з інтерфейсом TCP у мережі Ethernet) і перші SCADA-системи для віддаленого моніторингу та керування.

Автоматичне обмеження витрати: Замість неавтоматичних пристроїв (дросельних шайб) другого покоління використовувалися автоматичні регулятори перепаду тиску та регулювальні клапани, що працювали спільно, забезпечуючи точне регулювання і підвищуючи експлуатаційну стійкість. Це стало ключовою відмінністю від другого покоління, де обмеження витрати вимагало частой заміни неавтоматичних пристроїв (1–2 рази за опалювальний сезон).

Способи приєднання систем опалення та вентиляції. Існують два основні способи приєднання систем опалення та вентиляції до мережі ЦТ: залежний і незалежний.

Залежна схема приєднання (Рис. 1.16) застосовувалася в приватних будинках, будинках малоповерхової забудови, а також у квартирних (КТП) або малих теплових пунктах (МТП), які почали розвиватися саме в третьому поколінні, зазвичай при тиску в мережі ЦТ до 6 бар. Для підвищення надійності, особливо в країнах із низьким або середнім рівнем сервісного обслуговування, в ІТП використовувалися схеми з двома циркуляційними насосами.

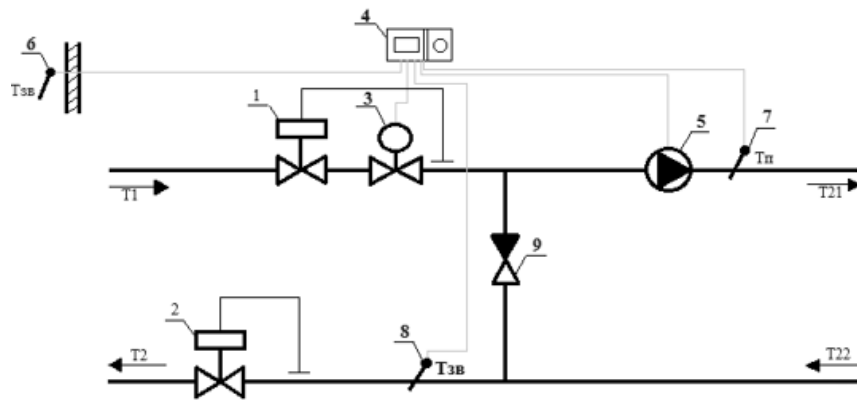


Рис.1.16 Принципова схема залежного приєднання ТП третього покоління.

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. T1 – подавальний трубопровід теплової мережі, T2 – зворотний трубопровід теплової мережі, T11 – подавальний трубопровід системи теплоспоживання, T21 – зворотний трубопровід системи теплоспоживання.

Незалежна схема приєднання (Рис. 1.17) стала популярною в багатоповерхових будівлях і за тиску в мережі ЦТ понад 6 бар, зокрема в країнах Західної Європи, завдяки вищій надійності та експлуатаційній стабільності. У країнах Східної Європи залежна схема залишалася більш поширеною через її простоту й нижчу вартість. Для висотних будівель застосовувалося зонування, щоб статичний тиск у системі не перевищував допустимий для обладнання, зокрема опалювальних приладів.

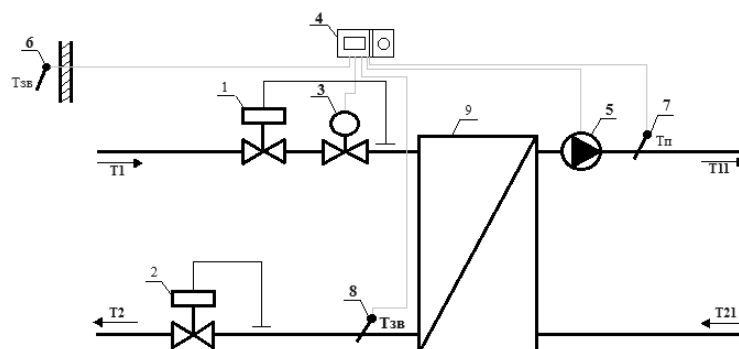


Рис.1.17 Принципова схема незалежного приєднання ТП третього покоління.

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- пластинчатий або паяний теплообмінник. T1 – подавальний трубопровід теплової мережі, T2 – зворотний трубопровід теплової мережі, T11 – подавальний трубопровід системи теплоспоживання, T21 – зворотний трубопровід системи теплоспоживання.

Компактність пристроїв (регулювальних клапанів, теплообмінників, запірної арматури) та низький рівень шуму (в першу чергу від насосного обладнання) дозволили розміщувати ІТП у підвальних і технічних приміщеннях навіть дуже малих розмірів.

Регулювання та облік теплової енергії. Автоматичне обмеження витрати в теплових пунктах третього покоління досягалося за допомогою двох ключових пристроїв (Рис. 1.18):

Регулювального клапана з електроприводом, який забезпечував автоматичне регулювання теплового потоку в системах опалення та вентиляції залежно від погодних умов або для підтримання постійної температури в системах ГВП.

Регулятора перепаду тиску, який стабілізував перепад тиску на клапані, забезпечуючи експлуатаційну сталість, високий авторитет регулювального клапана, довготривалий термін експлуатації електричного привода.

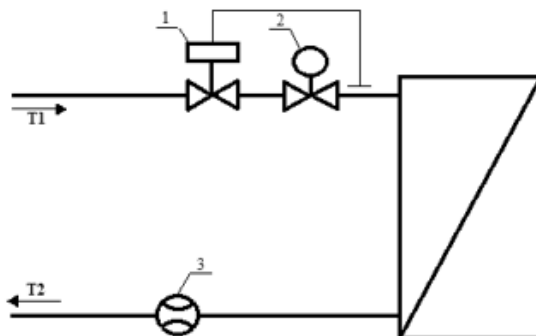


Рис. 1.18 Регулювання та облік теплової енергії ТП третього покоління

1 – регулятор перепаду тиску, 2 – регулювальний клапан з електроприводом, 3 – тепловий лічильник

Крім обмеження витрати, у теплових пунктах третього покоління широко застосовувалися прилади обліку теплової енергії (Рис. 1.18, поз. 3). Спочатку зчитування даних відбувалося вручну через фізичний контакт із приладом, але на пізніх етапах розвитку з'явилися інтерфейси передачі даних, такі як M-Bus (Meter-Bus), які дозволяли автоматично передавати інформацію в SCADA-системи виробників або сторонні SCADA-системи через електронні регулятори (контролери).

Система гарячого водопостачання. Найпоширенішою схемою приєднання ГВП у теплових пунктах третього покоління стала паралельна схема

(Рис. 1.19). На відміну від інерційних систем опалення, які не потребують швидкої реакції на відхилення температури, електроприводи для ГВП мали вищу швидкість переміщення штока (зазвичай 2–3 с/мм проти 12–15 с/мм для опалення), забезпечуючи швидке регулювання.

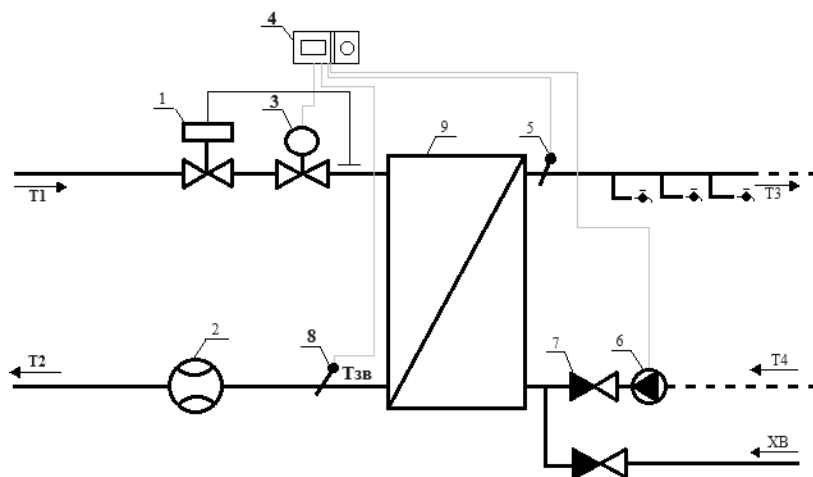


Рис.1.19 Принципова схема паралельного приєднання системи ГВП в ТП третього покоління.

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). T1 – подавальний трубопровід теплової мережі, T2 – зворотний трубопровід теплової мережі, T3 – в систему ГВП, T4 – циркуляційний трубопровід, ХВ – холодне водопостачання.

Паралельна схема з баком-акумулятором (Рис. 1.20) застосовувалася в системах, де потужності джерела тепла не вистачало для покриття максимального навантаження ГВП і інших систем теплоспоживання. Різниця між класичною паралельною схемою та схемою з баком-акумулятором полягала в тому, що використовуючи останню, можна дещо зменшити максимальну витрату, що призводить до зменшення діаметрів трубопроводів. Це може бути важливо при модернізації з розширенням існуючої системи (наприклад, підключення систем опалення, вентиляції та ГВП захисних споруд цивільного призначення в існуючих будівлях, будівництво нових будівель в межах теплового району з відсутністю можливості заміни розподільчих мереж тощо). Однак необхідно враховувати і збільшення теплових втрат від баку-акумулятора, більш складну схему підключення елементів та керування ними.

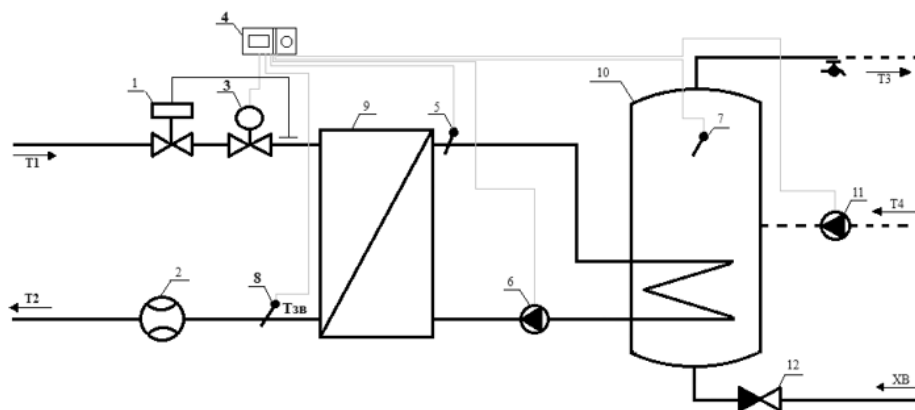


Рис.1.20 Принципова схема паралельного приєднання системи ГВП з баком-акумулятором в ТП третього покоління.

1 – регулятор перепаду тиску, 2 – тепловий лічильник, 3 – регулювальний клапан з електроприводом, 4 – електронний регулятор, 5 – датчик температури води на завантаження баку-акумулятору, 6 – насос завантаження баку-акумулятору, 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 рециркуляції, 12 – зворотний клапан. T1 – подавальний трубопровід теплової мережі, T2 – зворотний трубопровід теплової мережі, T3 – в систему ГВП, T4 – циркуляційний трубопровід, XB – холодне водопостачання.

Віддалене керування та моніторинг. Розвиток теплових пунктів третього покоління супроводжувався вдосконаленням автоматизації, зростанням кількості підключених елементів і потребою в детальному контролі параметрів. З'явилися перші SCADA-системи для віддаленого моніторингу та керування, які використовували стандартні інтерфейси (наприклад, RS-485) і протоколи, такі як Modbus RTU та Modbus TCP/IP у мережі Ethernet.

На початковому етапі пристрої різних виробників (наприклад, контролери й теплові лічильники) підключалися до окремих SCADA-систем без обміну даними між ними. Проте подальший розвиток показав потребу в інтеграції відкритих SCADA-систем, які могли б об'єднувати обладнання різних виробників і, при потребі, передавати інформацію стороннім програмним комплексам для обробки та аналізу (відкритий API). Практика продемонструвала значну роль SCADA-систем у керуванні складними комплексами обладнання, своєчасному реагуванні на аварійні ситуації та швидкому переналаштуванні за потреби.

Таблиця 4 надає систематизований огляд ключових параметрів теплових пунктів третього покоління, що відображають їхню енергоефективність, автоматизацію та адаптивність до сучасних вимог ЦТ.

Таблиця 4. Основні відмінні риси теплових пунктів третього покоління

Рівень теплового пункту	Темп-ий графік первинного контуру	Тип приєднання	Темп-ий графік вторинного контуру	Тип теплообмінника	Вимірювання енергії	Тип обмеження витрати	Регулювання теплового потоку	Тип циркуляції теплоносія
Розподільчі або мережеві	105-70 °C	Незалежне	95-60°C	Пластинчаті розбірні	Ультразвукові лічильники	Автоматичний	Автоматизована система з підключенням до SCADA	Насосна
На рівні будівлі	95-60°C	Залежне/Незалежне	< 90 °C	Паяні/розбірні пластинчаті	Ультразвукові лічильники	Автоматичний	Автоматизована система з підключенням до SCADA	Насосна

Четверте покоління

Розвиток теплових пунктів четвертого покоління (4ПЦТ) розпочався відносно недавно, і його напрямок визначив базовий фундаментальний звіт авторів Lund, H., Werner, S., Wiltshire, R., Svendsen, S., Thorsen, J. E., Hvelplund, F. і Mathiesen, B. V., який поділяє системи ЦТ на чотири покоління. Ця робота стала ключовою для багатьох подальших досліджень, зокрема й для цієї дисертаційної роботи, вплив спілкування з її авторами також відобразився на її напрямку [4]. Хоча деякі країни Західної Європи тільки почали переходити до 4ПЦТ, кількість досліджень у цьому напрямку, зокрема щодо теплових пунктів, є значною.

Основні тенденції та література. Теплові пункти в системах четвертого покоління (4ПЦТ) характеризуються продовженням тенденції зниження робочих температур до низькотемпературних (НТЦТ, 60–30°C) та ультра низькотемпературних (УНТЦТ, <45°C) режимів, що підвищує енергоефективність і сприяє ширшій інтеграції ВДЕ, таких як теплові насоси, геотермальна енергія та скидне тепло, забезпечуючи екологічність систем. На відміну від теплових пунктів третього покоління, які працювали з

середньотемпературними режимами (105–60°C), теплові пункти в системах 4ПЦТ демонструють вищу гнучкість завдяки автоматичному регулюванню теплогідравлічних параметрів за допомогою інтелектуальних пристроїв (регулятори тиску, комбіновані клапани тощо). Цей напрямок розвитку НТЦТ та УНТЦТ детально розкрито авторами Schmidt D., Lygnerud K., Werner S., Geyer R., Schrammel H., Østergaard D. S. і Gudmundsson O. у посібнику, який систематизує ключові рішення для зниження температур у системах ЦТ, стратегії впровадження НТЦТ та УНТЦТ, вказує на бар'єри в реалізації, а також на потенціал використання ВДЕ і скидного тепла [65].

Розвиток УНТЦТ також привертає значну увагу, оскільки ці системи працюють із температурами нижче 45°C, що може вимагати додаткового догріву або тимчасового підвищення температури для боротьби з патогенною бактерією *Legionella*. Автори Thorsen J. E., Ommen T., Nunna A. C., Zong Y., Yang X., Svendsen S., Zhu T., Du Y., Liang J., Rohlfes W. і Elmegaard, B. запропонували низку практичних рішень, зокрема використання локально розміщених теплових насосів (ТН) для догріву [66–69]. Автори Thorsen J. E., Gudmundsson O., Tunzi M. і Esbensen T. переосмислили схемні рішення ІТП, адаптуючи двоступеневі схеми приєднання ГВП другого покоління теплових пунктів під застосування в системах 4ПЦТ з використанням потенціалу зворотного теплоносія в НТЦТ [70]. Важливий внесок зробили Gudmundsson O., Schmidt R. R., Dyrelund A. і Thorsen J. E., які провели економічне й технічне порівняння систем 4ПЦТ і нової концепції п'ятого покоління ЦТ та централізованого холодопостачання (5ПЦТХ), запропонувавши комплексні рішення для теплових пунктів у кожній концепції [71].

Цифровизація та моніторинг. Зі складністю теплових пунктів зростає потреба в детальному моніторингу їхньої роботи та виявленні несправностей. Аналітичні дані, зокрема погодинне зчитування показників теплових лічильників, дозволяють отримувати додаткову інформацію для діагностики, аналізу аварій і скорочення часу їх усунення. Це детально описано авторами Gadd H. і Werner, S. у їхній роботі [72]. Потреба в обробці великих масивів даних

із теплових лічильників, контролерів та іншого обладнання в тепловому пункті підкреслює критичну роль цифровізації в секторі ЦТ. Моніторинг параметрів у реальному часі, віддалене керування, аналіз відхилень і розробка стратегій експлуатації відіграють ключову роль у роботі сучасних теплових пунктів. Автори Buffa S., Fouladfar M. H., Franchini G., Lozano Gabarre I. і Andrés Chicote M. аналізують сучасні методи керування теплових пунктів у системах 4ПЦТ і 5ПЦТХ, виявлення несправностей через цифрові інструменти, діагностику теплових пунктів та комерційні рішення, доступні на ринку [73].

Інноваційні концепції теплових пунктів. Сучасний розвиток 4ПЦТ супроводжується появою нових концепцій, зокрема комбінованих індивідуальних теплових пунктів (КІТП) і двонаправлених індивідуальних теплових пунктів (2Н-ІТП). 2Н-ІТП є логічним продовженням КІТП, уможливорюючи інтеграцію локальних джерел тепла (наприклад, теплові насоси, сонячні колектори) із системою ЦТ і передачу надлишків теплової енергії у мережу ЦТ. Цей напрямок є новим і перспективним, стираючи межу між четвертим і п'ятим поколіннями ЦТ та об'єднуючи їх у єдину концепцію розвитку розумної енергетичної системи (Smart energy system) [74]. 2Н-ІТП змінюють традиційну парадигму ЦТ, яка складалася з джерел, транспортної мережі й споживачів, додаючи новий елемент — теплових просьюмерів (споживачів, які в певний період часу можуть бути виробниками). Цей термін, широко поширений в електроенергетиці, лише починає набувати значення в секторі ЦТ.

2Н-ІТП перебувають на початковому етапі розвитку, але вже є ґрунтовні дослідження в цьому напрямку. Автори Pipiciello M., Caldera, M., Cozzini, M., Ancona M. A., Melino F. і Di Pietra B. розробили й реалізували стенд 2Н-ІТП, описавши його проектування, реалізацію та випробування прототипу [75]. Важливий внесок зробили Pipiciello M., Trentin F., Soppelsa A., Menegon D., Fedrizzi R., Ricci M., Di Pietra B. і Sdringola, P., які проаналізували роботу 2Н-ІТП з урахуванням реалістичних профілів теплового навантаження (наприклад, багатоквартирні будинки), джерел генерації (сонячні колектори, скидне тепло) і

різних температурних режимів ($80^{\circ}\text{C}/50^{\circ}\text{C}$ і $60^{\circ}\text{C}/30^{\circ}\text{C}$). Їхні розрахунки показали, що надходження тепла в систему ЦТ від локального виробництва може варіюватися від 21% до 100% протягом доби [76]. Автори Sdringola P., Ricci M., Ancona M. A., Gianaroli F., Capodaglio C. і Melino F. моделювали роботу 2Н-ІТП в програмному середовищі Dymola, підтвердивши працездатність через порівняння експериментальних даних із результатами моделювання [77]. Ці дослідження демонструють значний потенціал 2Н-ІТП і теплових просьюмерів, що потребує детального вивчення елементів системи, розрахунків, автоматизації та реальної експлуатації.

Додатковий внесок у дослідження роботи теплових просьюмерів зробили автори Brange L., Englund J., Lauenburg P., Kauko H., Husevåg Kvalsvik K., Rohde D., Nord N. і Utne A., які аналізували інтеграцію локальних джерел тепла в системи ЦТ. Зокрема, дослідження [78] фокусується на динамічному моделюванні місцевих теплових мереж із участю просьюмерів у Норвегії, підкреслюючи важливість адаптивного керування для балансування попиту й надлишків тепла від локальних джерел, таких як теплові насоси. Воно вказує на потенціал зниження енергоспоживання через оптимізацію теплового пункту, але зазначає обмеження моделі, пов'язані з кліматичними умовами Норвегії, що ускладнює її адаптацію до інших регіонів.

Дослідження [79] розглядає роль просьюмерів у шведських теплових мережах, акцентуючи на економічній і технічній доцільності інтеграції локальних систем опалення (зокрема, на основі теплових насосів) із центральними мережами. Воно демонструє, як 2Н-ІТП можуть підвищувати енергоефективність і зменшувати залежність від викопного палива, але вказує на бар'єри, такі як висока вартість інфраструктури та потреба в законодавчій підтримці для стимулювання розвитку теплових просьюмерів. Ці висновки підкреслюють актуальність теми цієї дисертаційної роботи «Системи теплопостачання з енергоефективними двонаправленими тепловими пунктами» і її внесок у розвиток розумних енергетичних систем, зокрема шляхом аналізу технічних і економічних аспектів для впровадження 2Н-ІТП в Україні.

Ключові зміни в теплових пунктах четвертого покоління. Теплові пункти 4ПЦТ вирізняються такими інноваціями:

Зменшення габаритів і металоємності: застосування комбінованих клапанів (які виконують кілька функцій у єдиному корпусі) і високоефективних пластинчатих теплообмінників зменшує розміри та матеріаломісткість теплового пункту;

Інтелектуальні електричні приводи: використання приводів із регуляторами перепаду тиску знижує коливання температур, підвищуючи стабільність роботи регульовальних клапанів;

Зниження рівня шуму: насосне обладнання з вбудованими частотними перетворювачами та електронно-комутованими (ЕС) двигунами забезпечує рівень шуму нижче 30–40 дБ, оптимізуючи керування швидкістю;

Бездротові комунікації: розвиток інтерфейсів, таких як Bluetooth, дозволяє налаштування насосів, теплових лічильників і контролерів через мобільні додатки;

Дротові комунікації: передача даних здійснюється з використанням стандартних інтерфейсів (наприклад, RS-485) і протоколів, таких як Modbus RTU та Modbus TCP/IP у мережі Ethernet. Для бездротового з'єднання використовуються маршрутизатори з підтримкою високошвидкісного мобільного інтернету 4G/5G..

SCADA-системи з штучним інтелектом (ШІ): впровадження відкритих SCADA-систем із підтримкою OPC-серверів, алгоритмів ШІ і машинного навчання для аналізу даних і оптимізації процесів.

Нові типи теплових пунктів: з'явилися теплові пункти із догрівом (з локальними тепловими насосами як бустерами для ГВП), комбіновані теплові пункти (поєднання кількох джерел, зокрема локальних) і двонаправлені теплові пункти (поєднання локальних джерел із передачею надлишків у мережу ЦТ).

Найпоширеніші способи приєднання систем опалення. У 4ПЦТ зберігаються два основні способи приєднання систем опалення до мережі ЦТ – залежна та незалежна схема приєднання.

Залежна схема (Рис. 1.21) застосовується в приватних будинках, будинках малоповерхової забудови і за тиску в мережі ЦТ до 6 бар, як і в третьому поколінні.

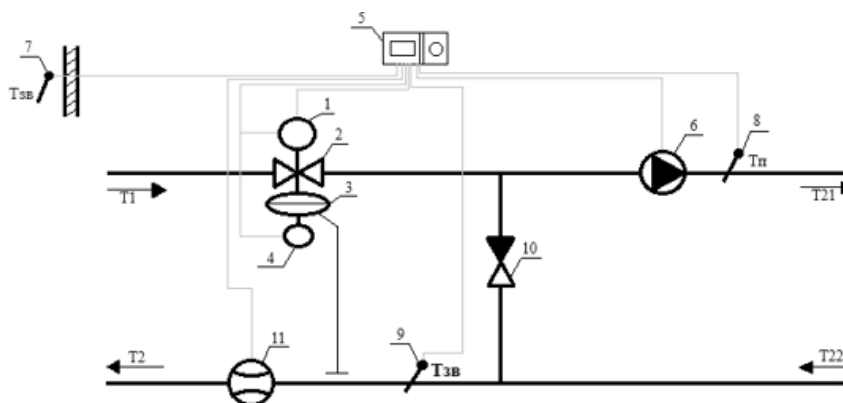


Рис.1.21 Принципова схема залежного приєднання ТП четвертого покоління.

1 – електричний привід регулювального клапана, 2 – комбінований регулювальний клапан, 3 – регулювальний елемент (перепад тиску), 4 – інтелектуальний електропривід регулювального елемента (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 – зворотний клапан на змішувальній перемичці, 11 – тепловий лічильник. T1 – подавальний трубопровід теплової мережі, T2 – зворотний трубопровід теплової мережі, T11 – подавальний трубопровід системи теплоспоживання, T21 – зворотний трубопровід системи теплоспоживання.

Однак використання залежної схеми стає обмеженим через перехід до НТЦТ і УНТЦТ, де переважно застосовуються радіаторні системи або термоактивні будівельні конструкції (наприклад, панельне опалення з полімерними трубопроводами, вбудованими в бетонні конструкції). Ці системи потребують високої якості води або водогліколевої суміші, що робить залежне приєднання менш доцільним.

Незалежна схема (Рис. 1.22) набуває більшого поширення через переваги: підтримання високої якості води у вторинному контурі завдяки варіативності контурів підживлення, гідравлічне розділення систем, відсутність впливу гідравліки первинного контуру на вторинний, мінімальні теплові втрати завдяки високоефективним теплообмінникам і контроль стану теплообмінника через

сучасні SCADA-системи. Це забезпечує ефективне обслуговування за експлуатаційних змін.

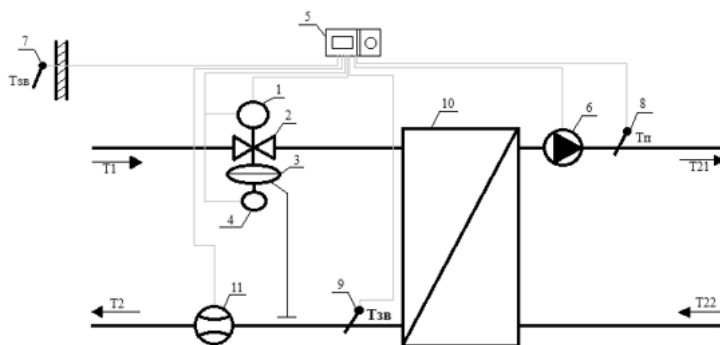


Рис.1.22 Принципова схема незалежного приєднання ТП четвертого покоління.

1 – електричний привід регулювального клапана, 2 – комбінований регулювальний клапан, 3 – регулювальний елемент (перепад тиску), 4 – інтелектуальний електропривід регулювального елемента (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. Т1 – подавальний трубопровід теплової мережі, Т2 – зворотний трубопровід теплової мережі, Т11 – подавальний трубопровід системи теплоспоживання, Т21 – зворотний трубопровід системи теплоспоживання.

Слід зазначити, що в розрізі ІТП, як правило, не потребується встановлення додаткових регуляторів тиску прямої дії (регулятори тиску «після себе» та «до себе»), так як окрім первинного гідравлічного балансування теплової мережі, що здійснюється самими ІТП, встановлюються елементи вторинного балансування – насосне обладнання з ЕС-двигунами для зонування розподільчих мереж за попитом та температурними режимами та регулятори тиску прямої дії з інтелектуальними електроприводами в критичних токах мережі (магістральні та розподільчі мережі) для гідравлічних змін відповідно до сезонності та періодів пікових навантажень.

Регулювання та облік теплової енергії. Автоматичне обмеження витрати в 4ПЦТ досягається за допомогою одного пристрою — комбінованого клапану з електроприводом (Рис. 23). Комбінований клапан може бути нерозбірним (усі складові в одному корпусі) або складатися з окремих елементів, як показано на Рис. 1.23.

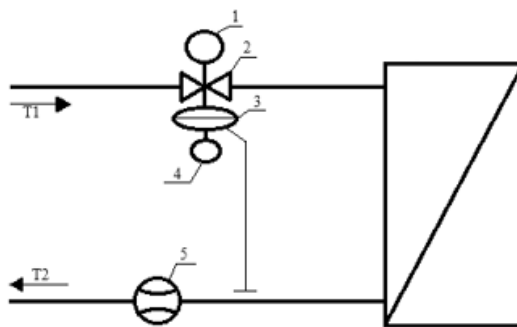


Рис. 1.23 Регулювання та облік теплової енергії ТП четвертого покоління

1 – електричний привід, 2 – незалежний від перепаду тиску регулювальний клапан, 3 – регулювальний елемент (обмежувач витрати або перепаду тиску), 4 – інтелектуальний електропривід (опційно для регулятора перепаду тиску), 5 – тепловий лічильник

Типові для ЦТ клапани частіше мають другий тип конструкції, що включає:

Незалежний від перепаду тиску регулювальний клапан (Рис. 1.23, поз. 2) із можливістю встановлення електроприводу (Рис. 1.23, поз. 1) для автоматичного регулювання теплового потоку в системах опалення та вентиляції залежно від погодних умов або для підтримання постійної температури в системах ГВП.

Регулювальний елемент (обмежувач витрати або перепаду тиску, Рис. 1.23, поз. 3), який стабілізує перепад тиску або витрату, інтегрований у нижню частину клапана. Цей елемент може бути класичним регулятором прямої дії, але в 4ПЦТ часто оснащується інтелектуальним електроприводом (Рис. 1.23, поз. 4) для автоматичної зміни перепаду тиску в залежності від добових та сезонних змін навантаження, що може викликати температурні коливання в внутрішніх контурах тепlopостачання будівлі. Це також актуально для модернізованих будівель, систем із змінним навантаженням (наприклад, вентиляція, ГВП) або при неоптимальних налаштуваннях електронних регуляторів.

Зчитування даних із теплових лічильників (Рис. 1.23, поз. 5) здійснюється через дротові (наприклад, M-Bus, Modbus RTU на RS-485) або бездротові (наприклад, Bluetooth, Wireless M-Bus у рамках Open Metering System) комунікаційні інтерфейси. Сучасні SCADA-системи, поєднані з алгоритмами ШІ, забезпечують аналіз основних параметрів, автоматичне формування звітів і виявлення несправностей, підвищуючи ефективність теплових пунктів.

Системи гарячого водопостачання. Однією з ключових особливостей теплових пунктів 4ПЦТ є здатність працювати з НТЦТ та УНТЦТ режимами, що забезпечують підвищену енергоефективність системи та сприяють інтеграції ВДЕ. Однак експлуатація таких систем потребує вирішення санітарно-гігієнічних та експлуатаційних викликів, зокрема ризику розмноження бактерії *Legionella*, яка активно розвивається в діапазоні температур 25–45°C, особливо у випадках тривалого невикористання ГВП або наявності бака-акумулятора. Для запобігання цьому температура в точках водорозбору має підтримуватися не нижче 50°C, а в баках-акумуляторах – досягати 60°C [80].

Через те, що НТЦТ та УНТЦТ не можуть самостійно забезпечити необхідні температурні параметри, у 4ПЦТ найпоширенішою є схема паралельного підключення теплообмінника з баком-акумулятором, що дає змогу підвищити гнучкість системи та інтегрувати локальні ВДЕ (Рис. 1.24).

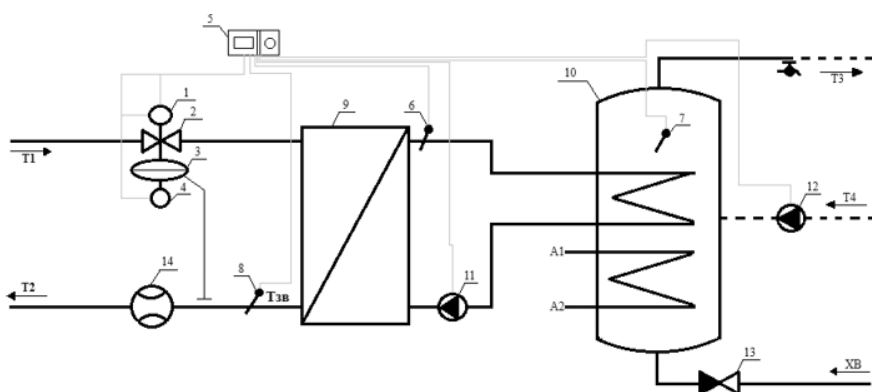


Рис.1.24 Принципова схема паралельного приєднання системи ГВП з баком-акумулятором в ТП четвертого покоління.

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 баку-акумулятора, 12 – насос рециркуляції, 13 – зворотний клапан, 14 – тепловий лічильник. T1 – подавальний трубопровід теплової мережі, T2 – зворотний трубопровід теплової мережі, T3 – в систему ГВП, T4 – циркуляційний трубопровід, XB – холодне водопостачання. A1 та A2 – точки приєднання бустера для догріву (наприклад, тепловий насос).

Для компенсації температурних обмежень ГВП використовують локальні джерела догріву, серед яких найефективнішими є теплові насоси малої потужності та електричні нагрівальні елементи [81].

Згідно з результатами досліджень, представлених у [70], запропоновано нову конструкцію теплового пункту, яка передбачає розділення контурів ГВП та циркуляції ГВП на окремі теплообмінники. Це дозволяє знизити температуру зворотного теплоносія за рахунок його додаткового охолодження через теплообмінник опалення, що особливо важливо для оптимізації режимів роботи НТЦТ та УНТЦТ. Згідно з моделями, така схема дозволяє зменшити температуру зворотного теплоносія на 5,4–8,3°C, що є значущим показником для підвищення ефективності 4ПЦТ.

Досвід упровадження таких рішень свідчить, що перехід на низькотемпературні схеми ГВП потребує комплексного підходу, включаючи оптимізацію температурних режимів, інтеграцію інтелектуальних алгоритмів керування, а також підбір локальних джерел догріву відповідно до профілю навантаження та характеристик споживача. Подальший розвиток таких рішень сприятиме зменшенню експлуатаційних витрат, покращенню енергоефективності та інтеграції відновлюваних джерел тепла у централізовані системи.

Віддалене керування та моніторинг. Цифровізація 4ПЦТ відзначається високим рівнем інтеграції керування всіма рівнями системи: від генерації до кінцевого споживача. На відміну від попередніх поколінь, де елементи управління (джерела, акумуляція, мережі, теплові пункти) часто функціонували ізольовано, 4ПЦТ вимагає інтеграції в системи енергетичного менеджменту, що забезпечують оптимізацію процесів у реальному часі.

Ключові особливості цифрового керування 4ПЦТ:

Розширене використання датчиків і IoT. Впровадження інтелектуальних лічильників, сенсорних технологій і пристроїв IoT забезпечує збирання великих обсягів даних про поточні робочі параметри системи;

Гнучке керування та алгоритмічна оптимізація. Використання AI/ML дозволяє прогнозувати попит і пропозицію тепла, автоматично коригувати параметри роботи насосів, теплообмінників та інших компонентів;

Системи SCADA нового покоління. Відкриті SCADA-платформи забезпечують можливість інтеграції обладнання різних виробників, підтримку відкритих комунікаційних протоколів (наприклад, Modbus RTU, BACnet, MQTT) та взаємодію з цифровими двійниками (Digital Twins);

Цифрові двійники теплових мереж. Як зазначено в [82], цифрові двійники дозволяють створювати точні цифрові моделі систем централізованого теплопостачання для їх аналізу, прогнозування та оптимізації.

Міжсекторна інтеграція. Використання цифрових інструментів дозволяє інтегрувати електричні, газові та теплові мережі, а також враховувати погодні умови та зміну тарифів у реальному часі.

Роль штучного інтелекту та аналітики даних. Використання AI та великих даних в управлінні 4ПЦТ сприяє:

Прогнозуванню споживання та оптимізації розподілу теплової енергії, що знижує пікові навантаження та покращує баланс попиту і пропозиції;

Діагностиці відхилень і виявленню аномалій у роботі обладнання, що мінімізує аварійність і витрати на обслуговування;

Зменшенню експлуатаційних витрат, оскільки алгоритми машинного навчання дозволяють зменшити невиправдані втрати теплової енергії.

На сьогодні комплексні програмні рішення (Рис. 1.25) ще перебувають на етапі розвитку, але саме вони забезпечать гнучке керування двонаправленими потоками енергії в 4ПЦТ.

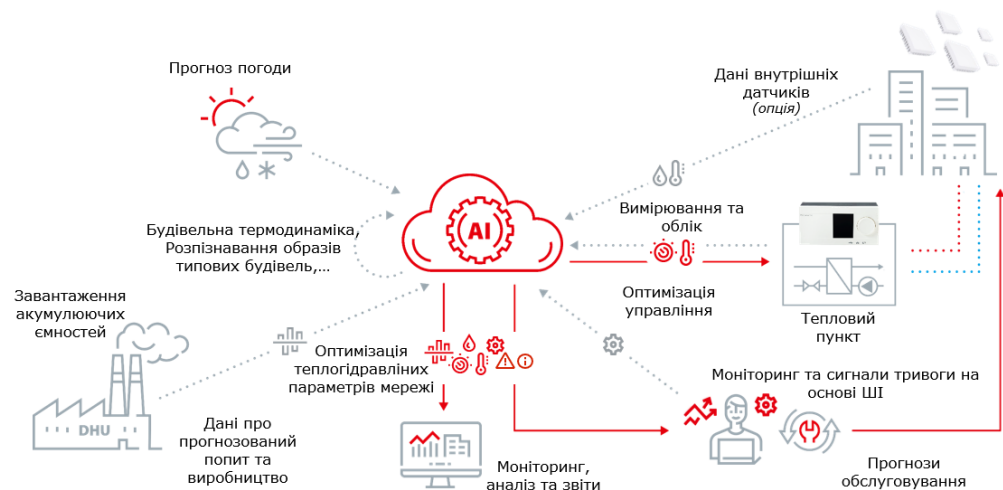


Рис.1.25 Приклад комплексного програмного рішення, що охоплює всі складові сучасних систем ЦТ з використанням штучного інтелекту для оптимізації

Можна виділити ключові особливості концепції комплексного програмного рішення для управління тепловими пунктами у 4ПЦТ із використанням штучного інтелекту (ШІ), що представлена на Рис.25 для оптимізації роботи систем ЦТ:

1. Інтеграція багаторівневих даних:

- Прогноз погоди та будівельна термодинаміка використовуються для передбачення навантажень та оптимізації режимів роботи теплових пунктів;
- Аналіз внутрішніх параметрів будівель (з даних датчиків) дозволяє динамічно адаптувати керування подачею тепла;

2. Моніторинг та прогнозування:

- Використання алгоритмів ШІ дозволяє виявляти аномалії в роботі обладнання, запобігаючи аварійним ситуаціям;
- Моніторинг сигналів тривоги та відхилень параметрів мережі покращує надійність теплопостачання;
- Постійна адаптація налаштувань (наприклад, зміна кута нахилу температурного графіку) для точного підтримання заданих користувачем параметрів.

Оптимізація роботи системи ЦТ:

- Прогнозування попиту на тепло та адаптація роботи теплових пунктів в реальному часі;
- Зниження теплових втрат через оптимальне балансування та регулювання параметрів мережі.

Автоматизація обслуговування:

- Розширений аналіз даних з датчиків дозволяє здійснювати прогнозне технічне обслуговування, що зменшує експлуатаційні витрати.

Майбутній розвиток цифрових систем керування в 4ПЦТ може передбачати вдосконалення алгоритмів керування тепловими просьюмерами, оптимізацію роботи локальних систем залежно від цін на електроенергію та погодних умов, а також прогнозування надлишків енергії, що можуть надходити

в мережу ЦТ. Впровадження таких рішень сприятиме інтеграції алгоритмів оптимізації роботи 2Н-ІТП, врахуванню динаміки цін на електроенергію та розширенню можливостей міжсекторної координації між тепловими, електричними та газовими мережами. Ці аспекти можуть стати предметом подальших досліджень у сфері інтелектуального керування системами ЦТ.

У Таблиці 5 представлено ключові характеристики теплових пунктів четвертого покоління, які є компонентами низькотемпературних (НТЦТ, 60–30°C) та ультра низькотемпературних (УНТЦТ, <45°C) систем ЦТ. Вони призначені для підключення систем опалення, вентиляції, ГВП і технологічних установок як окремих будівель (через ІТП), так і груп будівель або теплових районів (через РТП).

Основними особливостями цих теплових пунктів є:

- Інтелектуальні системи автоматизації з використанням стандартизованих інтерфейсів зв'язку;
- Автоматичне обмеження витрат за допомогою компактних комбінованих клапанів, що забезпечує гнучке регулювання теплового потоку;
- Використання SCADA-систем із підтримкою ІІІ, що підвищує енергоефективність і адаптивність до змінних режимів роботи;
- Розширена інтеграція ВДЕ завдяки можливості підключення нових типів теплових пунктів, зокрема 2Н-ІТП.

Ці характеристики дозволяють забезпечити ефективне керування тепловими потоками, підвищити гнучкість мереж та адаптуватися до зростаючого використання ВДЕ.

Таблиця 5. Основні відмінні риси теплових пунктів четвертого

Рівень теплового пункту	Темп-ий графік первинного контуру	Тип приєднання	Темп-ий графік вторинного контуру	Тип теплообмінника	Вимірювання енергії	Тип обмеження витрати	Регулювання теплового потоку	Тип циркуляції теплоносія
Розподільчі або мережеві	60 – 30 °C	Незалежне	50-25°C	Пластинчаті розбірні	Ультразвукові лічильники з дротовим/бездротовим	Автоматичний з інтелектуальним електронним приводом	Автоматизована система з підключенням до SCADA	Насосна з підключенням до SCADA-системи

					зв'язко м			
На рівні будівлі	50-25°C	Залежне/Не залежне	< 45 °C	Паяні/роз бірні пластинч аті	Ультраз вукові лічильн ики з дротови м/бездр отовим зв'язко м	Автомати чний з інтелекту альним електроп риводом	Автоматизов ана система з підключення м до SCADA та використання м III	Насосна з підключе нням до SCADA- системи

1.2.4. Індивідуальні теплові пункти в Україні

Індивідуальні теплові пункти (ІТП) відіграють ключову роль у забезпеченні енергоефективності, надійності та гнучкості ЦТ. Аналіз технічних правил, нормативних документів і стандартів, що регулюють проектування, експлуатацію та модернізацію ІТП у різних країнах, зокрема Великобританії, Фінляндії, Швейцарії та Швеції, свідчить, що вимоги до ІТП в Україні сформовано на достатньо високому рівні, охоплюючи ключові компоненти, схемні рішення та принципи автоматизації сучасних систем [83–86].

Ці вимоги базуються на національних будівельних нормах, зокрема ДБН В.2.5-67 «Опалення, вентиляція та кондиціонування» [87] і ДБН В.2.5-39 «Теплові мережі» [88], які встановлюють чіткі критерії для конструктивних рішень, автоматизації, гідравлічного балансування та енергетичної ефективності ІТП. Зокрема, ДБН В.2.5-67 визначає вимоги до вибору схем приєднання (залежних і незалежних) залежно від поверховості будівлі, тоді як ДБН В.2.5-39 акцентує на автоматизації, використанні резервних насосів і якості теплоносія, що є основою для забезпечення стійкості систем ЦТ.

Національні нормативи враховують як технічні, так і економічні аспекти експлуатації ІТП, включаючи погодозалежне регулювання, теплообмінники, регулятори перепаду тиску та циркуляційні насоси, що дозволяє інтегрувати ІТП у сучасні системи тепlopостачання. Проте реалізація цих вимог в Україні стикається з низкою суттєвих бар'єрів, які обмежують енергоефективність і стійкість систем ЦТ. Серед ключових викликів можна виділити:

- Застарілу інфраструктуру: Більшість діючих теплових мереж і ІТП в Україні належать до 2ПЦТ, із залежними схемами приєднання,

застарілими трубопроводами й низькою якістю теплоносія, що спричиняє значні теплові втрати та підвищену аварійність;

- *Нестачу кваліфікованих кадрів:* Обслуговуючий персонал часто має обмежену підготовку в питаннях автоматизації, енергоефективності та інноваційних технологій, що ускладнює експлуатацію сучасних ІТП;
- *Відсутність розвиненого ринку тепла:* Нерегульованість питань балансової приналежності, тарифоутворення й стимулів для операторів ЦТ перешкоджає впровадженню інноваційних та енергоефективних рішень.

Ці бар'єри призводять до того, що ІТП в Україні часто експлуатуються з нижчою енергоефективністю, ніж це можливо за сучасними технологіями, і не відповідають вимогам 4ПЦТ, які передбачають гнучкість, інтеграцію ВДЕ, та цифровізацію.

Окрім державних будівельних норм, в Україні існує достатній обсяг наукової та технічної літератури, яка поглиблює розуміння про будову ІТП. Зокрема, треба відзначити роботи, які вже згадувались в описі другого покоління теплових пунктів. Наприклад, книга [56] дозволяє детально проаналізувати сучасні принципи автоматизації, розрахунку та побудови ІТП, а всеохоплюючий звіт [89] містить аналітичний огляд можливостей масового впровадження ІТП в Україні з урахуванням світового досвіду. У ньому представлено оцінку поточного стану ІТП, рекомендації щодо їх модернізації для підвищення енергоефективності та надійності роботи в системах ЦТ, а також розглянуто різні моделі фінансування та реалізації проектів з впровадження сучасних ІТП. Ці джерела доповнюють нормативну базу, забезпечуючи теоретичну та практичну основу для аналізу ІТП в Україні.

Порівняння визначень ІТП у науковій літературі, представлене в Таблиці 6, дозволяє систематизувати їхні ключові характеристики.

Таблиця 6. Визначення ІТП в Україні та найбільш поширеній європейській літературі

№ п/п	Визначення	Література
1	Тепловий пункт (ТП) - розташований у відособленому приміщенні працездатний комплекс обладнання (пристроїв), який забезпечує приєднання пристроїв цього комплексу до магістральної теплової мережі та (за потреби) мережі холодного водопостачання, керування	ДБН В.2.5-39 «Інженерне обладнання будинків і споруд. Зовнішні мережі та споруди. Теплові мережі.»

	режимами теплоспоживання, трансформацію теплової енергії, регулювання параметрів теплоносія й розподіл теплової енергії за типами споживання (включно з підігрівом води) у розподільні мережі (опалення, гарячого водопостачання) та захист цих розподільних мереж від аварійного підвищення параметрів теплоносія	
2	В тепло- та холодопостачання концепція ІТП прийнята по аналогії з тим, як використовується підстанція в електроенергетиці. Таким чином, ІТП – це блок, в якому енергія що розподіляється, перетворюється з більш високих параметрів до нижчих, з точки зору одного або декількох характерних параметрів, пов'язаних з енергією і в якому подача енергії може бути перервана у випадку аварії або для ремонту.	«District heating and cooling» Svend Frederiksen, Professor at Lund University and Sven Werner, Professor at Halmstad University
3	ІТП – це комплект пристроїв, підключених з одного боку до вузла обліку тепла, з іншого – до мереж ГВП та опалення з розширювальними баками. Він включає в себе теплообмінники, первинну сторону і, можливо, пристрої керування для вторинної сторони, насосні пристрої, клапани та фітинги, а також необхідну трубопровідну арматуру.	«District heating of buildings Regulations and guidelines Publication K1/2013» Finnish Energy ry 2014 (translation in English 2017)
4	ІТП призначені для різних цілей, наприклад, для індивідуальних будинків, багатоквартирних будинків та інших будівель і приміщень. Зазвичай вони виготовляються та поставляються у вигляді збірних одиниць, але також можуть бути побудовані на місці. Кожен ІТП є завершеним блоком, що включає теплообмінники, контрольне обладнання, обладнання безпеки тощо.	«District Heating Substations. Design and installation.» The Swedish District Heating Association, Stockholm.
5	ІТП визначає теплообмінну установку як сполучну ланку між зовнішньою мережею та установками споживача. ІТП використовується для передачі тепла або теплоносія до установки споживача відповідно до норм щодо тиску, температури та витрати. ІТП традиційно є межею власності між теплопостачальною організацією і споживачем тепла. Умови для проектування ІТП встановлюються постачальником тепла з правилами технічного підключення, які є частиною договору про теплопостачання.	«Handbook on planning of district heating networks.» Nussbaumer, T., Thalmann, S., Jenni, A., & Ködel, J. (2020). Bern: Swiss Federal Office of Energy.

Як видно з таблиці, ІТП у всіх досліджуваних країнах визначається як комплекс автоматичного обладнання та пристроїв, призначений для інтеграції внутрішніх систем теплопостачання будівлі (опалення, вентиляція та ГВП тощо) із зовнішніми тепловими мережами. Однак відмінності полягають у специфіці операційних циклів, рівнях автоматизації, енергетичних стандартів і підходах до приєднання (залежне чи незалежне). Наприклад, у країнах Західної Європи, таких як Швеція та Фінляндія, акцент робиться на незалежному приєднанні через теплообмінники, що забезпечує більшу енергоефективність і гнучкість, тоді як в Україні переважає залежне приєднання через економічні міркування та обмеження інфраструктури, що відображає розрив у технологічному розвитку.

Залежне приєднання в ІТП України: технічні особливості та обмеження

Однією з домінуючих особливостей ІТП в Україні є широке використання залежного (прямого) приєднання (Рис. 1.26), на відміну від європейських країн, де переважає незалежне приєднання через теплообмінники. Основною причиною такої переваги є економічна доцільність: залежна схема є дешевшою через відсутність теплообмінника та контуру підживлення, а циркуляція в контурі теплоспоживання будівлі забезпечується через змішувальну перемичку із зворотним клапаном (позиція 3 на Рис. 1.26). Це дозволяє знизити початкові капіталовкладення, але суттєво обмежує енергоефективність і гнучкість системи.

Принцип роботи залежної схеми полягає в прямій подачі теплоносія з первинної теплової мережі (Т1) у вторинний контур системи теплоспоживання будівлі (Т21). Ключовим елементом є погодозалежний регулятор теплового потоку, який складається з електронного регулятора (позиція 4), регулювального клапана з електроприводом (позиція 2) та датчиків температури: зовнішнього повітря (позиція 7), теплоносія на вході в систему (позиція 6) і зворотного теплоносія (позиція 8). Регулювання базується на усередненій температурі в приміщеннях, заданій сервісним інженером, або на даних датчика температури в еталонному приміщенні з найбільшими питомими тепловтратами, що підвищує адаптивність системи до попиту.

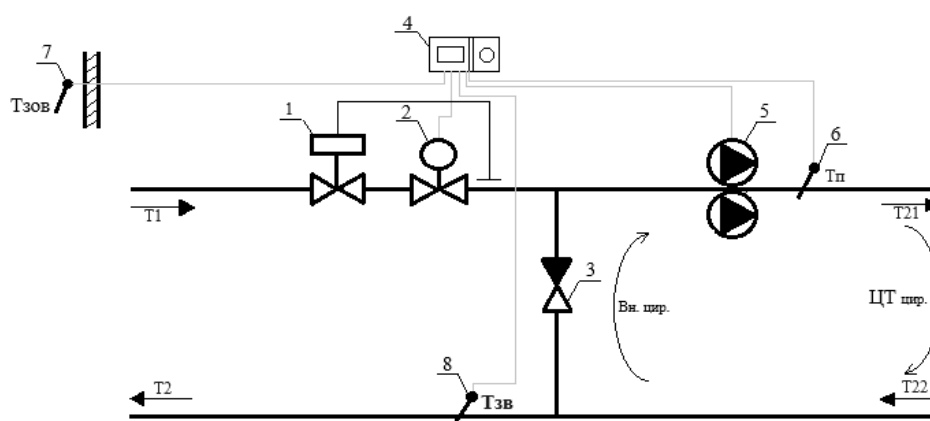


Рис.1.26 Принципова схема залежного приєднання ІТП в Україні.

1 – регулятор перепаду тиску, 2 – регулювальний клапан з електроприводом, 3 – зворотний клапан на змішувальній перемичці, 4 – електронний регулятор, 5 – циркуляційні насоси (робочий та резервний), 6 – датчик температури води в системі опалення, 7- датчик температури зовнішнього повітря, 8 – датчик температури води в зворотному трубопроводі.

Регулятор перепаду тиску (позиція 1) відіграє критичну роль у забезпеченні стабільності системи: він обмежує максимальну витрату в поєднанні з регулювальним клапаном, забезпечує гідравлічне балансування теплової мережі, запобігає перевитраті енергії в системах теплоспоживання й подовжує строк експлуатації електроприводу, працюючи в режимі стабільного перепаду тиску. Підвищення зовнішнього авторитету клапана (співвідношення втрат тиску на максимально відкритому клапані до максимально можливого перепаду на регулювальній ділянці) покращує якість регулювання й енергоефективність, що підтверджено в дослідженнях [90, 91]. Проте залежне приєднання має суттєві недоліки: низьку енергоефективність, підвищену вразливість до забруднень теплоносія, що може бути перешкодою для НТЦТ та УНТЦТ та обмежену інтеграцію з ВДЕ чи 2Н-ТП, які є пріоритетом для 4ПЦТ.

Ще однією особливістю ІТП в Україні є обов'язкове використання двох циркуляційних насосів, як передбачено ДБН В.2.5-39 [88, пункт 17.13]: «Автоматизація теплового пункту повинна забезпечувати включення резервного насоса при відключенні робочого». Ця вимога обумовлена специфікою українського ринку, зокрема відсутністю розвиненого ринку тепла, низькою кваліфікацією обслуговуючого персоналу, неврегульованістю питань балансової приналежності й обслуговування ІТП. У країнах із розвиненим ринком тепла, таких як Швеція чи Данія, використання одного насоса в ІТП є достатнім за умови належної кваліфікації операторів і сучасного обладнання, що знижує операційні витрати. Умови в Україні, однак, вимагають резервного насоса для забезпечення надійності, що підвищує капітальні та експлуатаційні витрати, але зменшує ризик аварій.

Незалежне приєднання в ІТП України: переваги та виклики

Незалежне (непряме) приєднання в ІТП (Рис. 1.27) є менш поширеним у Україні, але застосовується там, де це обов'язково за ДБН В.2.5-67 — зокрема, для будівель дванадцяти поверхів і вище.

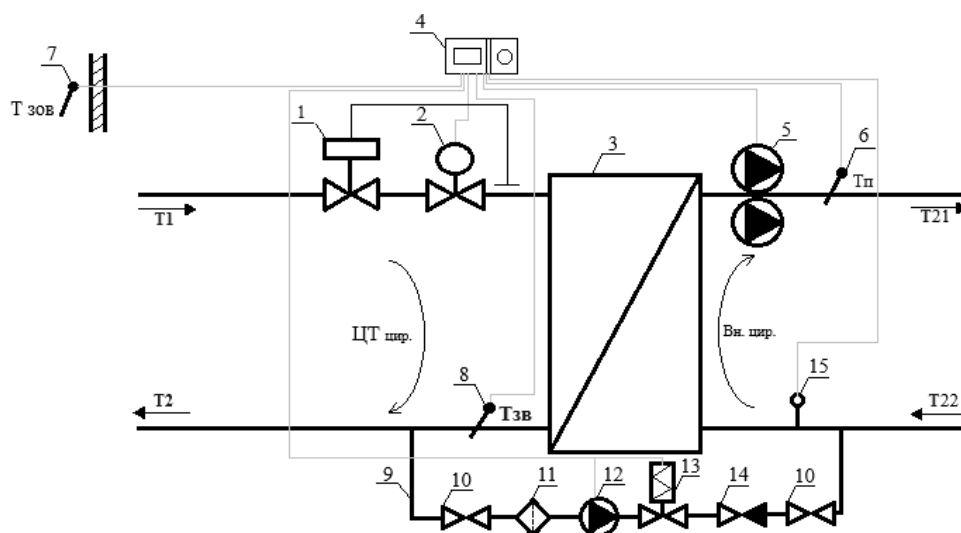


Рис.1.27 Принципова схема незалежного приєднання ІТП в Україні.

1 – регулятор перепаду тиску, 2 – регулювальний клапан з електроприводом, 3 – паяний або розбірний пластинчатий теплообмінник, 4 – електронний регулятор, 5 – циркуляційні насоси (робочий та резервний), 6 – датчик температури води в системі опалення, 7- датчик температури зовнішнього повітря, 8 – датчик температури води в зворотному трубопроводі, 9 – контур підживлення, 10 – запірні арматури, 11 – фільтр сітчастий, 12 – підживлювальний насос, 13 – електромагнітний клапан, 14 – зворотний клапан, 15 – датчик або реле тиску.

Ця схема складніша й дорожча через наявність теплообмінника (позиція 3) і контуру підживлення (позиція 9), але забезпечує значні переваги: гідравлічне відокремлення внутрішнього контуру системи теплоспоживання (Т21) від теплової мережі (Т1), що запобігає потраплянню забруднень (наприклад, сміття чи корозійних частинок) у вторинний контур і знижує тиск у первинній мережі. Це, у свою чергу, зменшує споживання електроенергії мережевими насосами, знижує аварійність системи ЦТ і підвищує її надійність та довговічність.

Для ІТП в Україні зазвичай використовуються розбірні пластинчаті теплообмінники, що дозволяють проводити технічне обслуговування в умовах низької якості теплоносія, характерної для вітчизняних мереж. Паяні пластинчаті теплообмінники, які вимагають якісної гідравлічної промивки через неможливість розбирання, застосовуються рідше через їхню вищу чутливість до умов експлуатації. Контур підживлення в сучасних ІТП є повністю автоматизованим, на відміну від систем другого покоління, де використовувалися негерметичні регулятори прямої дії. Сучасний контур включає підживлювальний насос (позиція 12), електромагнітний клапан із 100%-ю герметичністю (позиція 13), датчик або реле тиску приєднане до зворотного

трубопроводу (позиція 15) і електронний регулятор (позиція 4), що здійснює керування контуром. При зниженні тиску в системі датчик передає сигнал до електронного регулятора, який активує клапан і, за потреби, насос, забезпечуючи автоматичне відновлення тиску. Якщо тиск не стабілізується протягом заданого часу, спрацьовує сигнал аварії, що вимагає втручання сервісного інженера.

Незалежне приєднання є ключовим етапом інтеграції ІТП у 4ПЦТ, оскільки сприяє ширшому використанню ВДЕ, КІТП, 2Н-ІТП та будівельних систем із підвищеною енергоефективністю, зокрема панельного опалення й охолодження, а також термоактивних конструкцій. Це, у свою чергу, створює передумови для поступового переходу до УНТЦТ. Проте в Україні його впровадження обмежене високими капітальними витратами, недостатньою модернізацією мереж і відсутністю стимулів для операторів ЦТ, що є предметом подальшого аналізу.

Вузли обліку в ІТП: технічні та комерційні функції

Вузли обліку, хоч і не зображені на Рис. 1.26 і 1.27, є невід'ємною частиною ІТП, забезпечуючи моніторинг енергоспоживання. Згідно з [92], вони можуть виконувати як комерційні, так і технічні функції. На Рис. 1.28 показано типову схему ІТП із вузлами обліку, де перед регулювальною ділянкою встановлюється тепловий лічильник, що складається з одного або двох ультразвукових витратомірів (позиція 1), двох датчиків температури (позиція 2) і теплового обчислювача (позиція 3). Електронний регулятор (позиція 4) інтегрує лічильник через стандартну шину M-Bus (позиція 6) для передачі даних у SCADA-систему теплопостачальної чи сервісної організації, забезпечуючи точний облік теплової енергії.

Вузол обліку підживлювальної води (позиція 5), як правило, є технічним і складається з механічного лічильника з імпульсним виходом (позиція 7), який використовується лише в незалежних схемах для моніторингу витрати теплоносія. Упровадження цифрових систем моніторингу є важливим кроком до

забезпечення прозорості та підвищення енергоефективності обліку енергії в системах ЦТ.

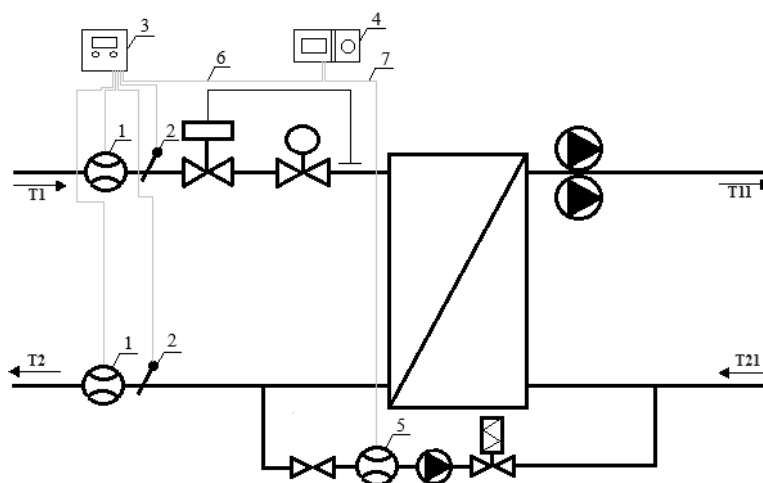


Рис.1.28 Принципова схема незалежного приєднання ІТП з вузлами обліку, призначеними для вимірювання спожитої теплової енергії та підживлювальної води

1 – витратоміри вузла обліку теплової енергії на подавальному та зворотному трубопроводах, 2 – датчики температури вузла обліку теплової енергії на подавальному та зворотному трубопроводах, 3- теплообчислювач вузла обліку теплової енергії, 4 – електронний регулятор (контролер), 5 – вузол обліку підживлювальної води, 6 – шина m-bus вузла обліку теплової енергії, 7 – імпульсний вихід вузла обліку підживлювальної води

Системи ГВП в ІТП: паралельне приєднання та інновації

Крім залежного й незалежного приєднання систем опалення та вентиляції, в ІТП України часто застосовується паралельна схема приєднання гарячого водопостачання (Рис. 1.29). Принцип роботи первинного контуру аналогічний незалежному приєднанню, за винятком вимоги до швидкого реагування на відхилення температури, що забезпечується електроприводом із часом переміщення штока не більше 3 с/мм. Це дозволяє підтримувати стабільну температуру ГВП на рівні не нижче 55°C, як передбачено для закритих систем ЦТ.

Згідно з Рис. 1.29, теплоносій із теплової мережі (Т1) надходить до теплообмінника (позиція 3), де нагріває питну холодну воду з системи холодного водопостачання (ХВ) у вторинному контурі, а потім повертається до мережі (Т2). Регулятор теплового потоку, що складається з електронного регулятора (позиція 4), регулювального клапана з електроприводом (позиція 2) і датчиків температури (позиція 5 для подачі, позиція 6 для зворотного потоку), забезпечує

стабільне підтримання температури на заданому рівні. Два циркуляційні насоси (позиція 7) підтримують циркуляцію невикористаної води в системі ГВП. Регулятор перепаду тиску (позиція 1) гарантує гідравлічне балансування, як описано для Рис. 1.26.

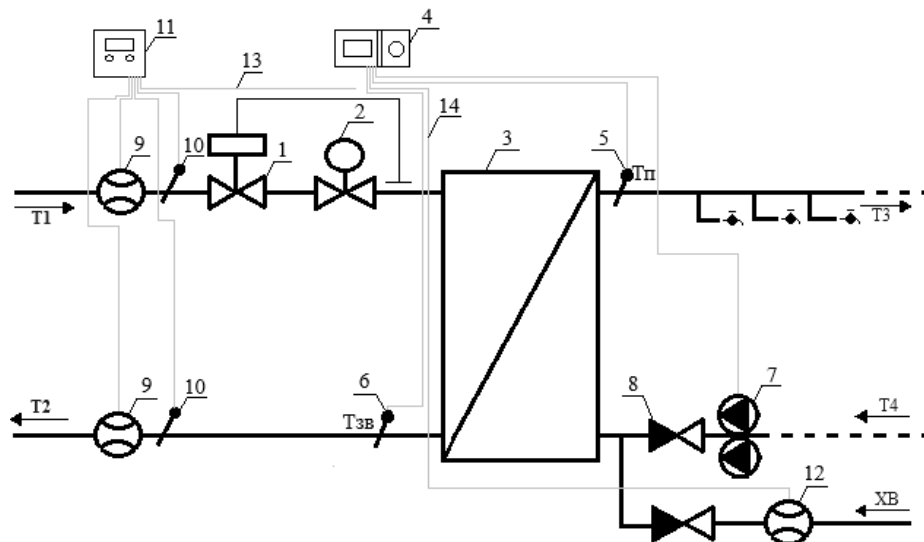


Рис.29 Принципова схема паралельного приєднання системи ГВП в Україні.

1 – регулятор перепаду тиску, 2 – регулювальний клапан з електроприводом, 3 – паяний або розбірний пластинчатий теплообмінник, 4 – електронний регулятор (контролер), 5- датчик температури води, що надходить в систему ГВП, 6 – датчик температури води в зворотному трубопроводі, 7 – насос рециркуляції (робочий та резервний), 8 – зворотний клапан, 9 – витратоміри вузла обліку теплової енергії на подавальному та зворотному трубопроводах, 10 – датчики температури вузла обліку теплової енергії на подавальному та зворотному трубопроводах, 11- теплообчислювач вузла обліку теплової енергії, 12 – вузол обліку холодної води, 13 – шина m-bus вузла обліку теплової енергії, 14 – імпульсний вихід вузла обліку підживлювальної води.

Тепловий лічильник із ультразвуковими витратомірами (позиція 9), датчиками температури (позиція 10) та обчислювачем (позиція 11) забезпечує точний облік теплової енергії. Вузол обліку холодної води (позиція 12) використовується як комерційний лічильник. Шина M-Bus (позиція 13) для теплового лічильника та імпульсний вихід (позиція 14) забезпечують передачу даних через електронний регулятор до SCADA-системи для централізованого моніторингу, аналізу та оптимізації роботи системи.

Перспективи розвитку двонаправлених індивідуальних теплових пунктів (2Н-ІТП) в Україні

Двонаправлені індивідуальні теплові пункти (2Н-ІТП) представляють інноваційний підхід до модернізації систем ЦТ в Україні, що дозволяє не лише

отримувати тепло з теплової мережі для опалення, вентиляції та ГВП, але й передавати надлишки тепла, генеровані в будівлі, назад у мережу. Такий підхід є перспективним для підвищення енергоефективності, гнучкості та стійкості систем ЦТ, особливо в умовах переходу до 4ПЦТ. 2Н-ІТП інтегрують локальні джерела енергії, такі як теплові насоси, які можуть генерувати тепло для систем забезпечення мікроклімату будівель та ГВП, використовуючи відновлювані джерела (наприклад, повітря, ґрунт чи воду), а також передавати надлишкове тепло, отримане від внутрішніх систем або надлишків виробництва у мережу ЦТ.

Крім того, 2Н-ІТП відкривають можливості для використання надлишків тепла від промислових і комерційних об'єктів, таких як центри обробки даних, супермаркети чи інші підприємства, які генерують значні обсяги теплової енергії, що може бути інтегровано в систему опалення через контури рекуперації тепла. На рівні мереж 2Н-ІТП дозволяють інтегрувати ВДЕ, наприклад, геотермальне тепло, а також когенераційні установки малої та середньої потужності, які можуть бути підключені через РТП. Така інтеграція сприяє балансуванню навантаження в системах ЦТ, підвищенню енергоефективності та диверсифікації енергоресурсів на різних рівнях системи, роблячи 2Н-ІТП важливим елементом переходу до розумних і стійких енергетичних систем в Україні.

Основна перевага 2Н-ІТП полягає в їхній здатності функціонувати як теплові просьюмери — споживачі, які одночасно можуть бути виробниками тепла. Це дозволяє адаптувати систему до змін попиту, погодних умов і економічних факторів, оптимізуючи споживання енергії та зменшуючи залежність від традиційних джерел. Наприклад, теплові насоси, інтегровані в 2Н-ІТП, можуть працювати в різних режимах: нагрівати теплоносії для опалення в холодний період, а в теплий період — передавати надлишки тепла, отримані від рекуперації або ВДЕ, у мережу. Моделювання режимів роботи теплового насоса, зокрема його ефективності (коефіцієнт перетворення COP), дозволяє оцінити потенціал енергозбереження, стабільність системи та вплив на мережу ЦТ.

У контексті України впровадження 2Н-ІТП стикається з низкою викликів, таких як застаріла інфраструктура теплових мереж, яка не завжди готова до надходження надлишків тепла від таких систем, високі капітальні витрати на модернізацію обладнання, недостатня кваліфікація персоналу в управлінні інноваційними системами та відсутність регуляторних стимулів для операторів ЦТ. Проте потенціал 2Н-ІТП є значним, адже вони сприяють інтеграції ВДЕ, зменшують енергоспоживання та сприяють переходу до розумних енергетичних систем (smart energy systems), де будівлі можуть активно взаємодіяти з мережею, забезпечуючи її стабільність і стійкість.

Наукові дослідження, присвячені 2Н-ІТП, демонструють їхній потенціал для систем ЦТ. Наприклад, аналіз експериментальної оцінки роботи 2Н-ІТП із профілями навантаження теплових просьюмерів і розподіленої генерації показує, що такі системи можуть ефективно балансувати попит і пропозицію тепла, знижуючи енергетичні втрати та підвищуючи енергоефективність[76]. Моделювання прототипів 2Н-ІТП для ЦТ із тепловими просьюмерами підтверджує, що інтеграція теплових насосів дозволяє досягти високої гнучкості, адаптації до мінливих умов і стабільності мережі, що є особливо актуальним для України з її потребою модернізації застарілих систем[77].

Перспективи розвитку 2Н-ІТП в Україні залежать від подолання зазначених бар'єрів через інвестиції в інфраструктуру, навчання персоналу, розробку регуляторних норм і стимулів для операторів. Ці системи мають потенціал стати ключовим елементом модернізації ЦТ, сприяючи енергетичній незалежності, зменшенню викидів парникових газів і підвищенню комфорту для споживачів. Дослідження роботи 2Н-ІТП, зокрема з використанням теплових насосів і моделюванням їхніх режимів, є важливим кроком до визначення оптимальних технічних і економічних рішень, що є центральною темою цієї дисертації.

Малі (МТП) та квартирні (КТП) теплові пункти в Україні

Малі (МТП) та квартирні (КТП) теплові пункти є інноваційним, але недостатньо поширеним рішенням у системах ЦТ та внутрішнього

теплопостачання будівель в Україні. МТП/КТП — це елементи ЦТ, призначені для приєднання систем теплоспоживання однієї квартири, односімейного будинку або систем забезпечення мікроклімату малої потужності (до 120 кВт) до теплової мережі. Їхня ефективність полягає в оптимізації системи теплопостачання, що зменшує кількість внутрішніх трубопроводів у будівлі, знижуючи теплові втрати та споживання електроенергії для циркуляційних насосів ГВП, характерних для традиційних двоконтурних ІТП.

Дослідження [93] показало, що впровадження МТП/КТП у багатоквартирному будинку в Данії 1970 року побудови дозволило знизити річну потребу в теплі на 4% і скоротити споживання електроенергії насосами на 50% завдяки відсутності насосів ГВП. У контексті України це рішення є особливо актуальним для нового будівництва, де можливе оптимальне проектування внутрішніх інженерних систем для мінімізації теплових втрат і скорочення енергоспоживання.

Технічні особливості та схеми МТП/КТП

На Рис. 1.30 представлено принципова схема і зовнішній вигляд типового МТП/КТП, який забезпечує децентралізоване керування системами забезпечення мікроклімату (опалення або вентиляція) й ГВП для квартири чи окремого приміщення. Система включає вузол обліку теплової енергії (позиція 1) і холодної води (позиція 6) для точного моніторингу споживання з можливістю дистанційного зняття даних. Комбінований клапан (позиція 4) і регулятор перепаду тиску (позиція 3) підтримують стабільну температуру в контурі ГВП і максимізують ефективність із використанням мікропластинчастого теплообмінника (позиція 5).

Контур рециркуляції з насосом (позиція 7) часто виключають, оскільки близькість теплового пункту до точок водозбору гарантує стабільну температуру ГВП без додаткових енергозатрат. Система опалення може приєднуватися за залежною або незалежною схемою, використовуючи незалежний від перепаду тиску регулювальний клапан з електроприводом або комбінований клапан

прямої дії (позиція 2). Такий підхід мінімізує втрати тепла в трубопроводах і підвищує енергоефективність, що є критично важливим для інтеграції МТП/КТП у 4ПЦТ.

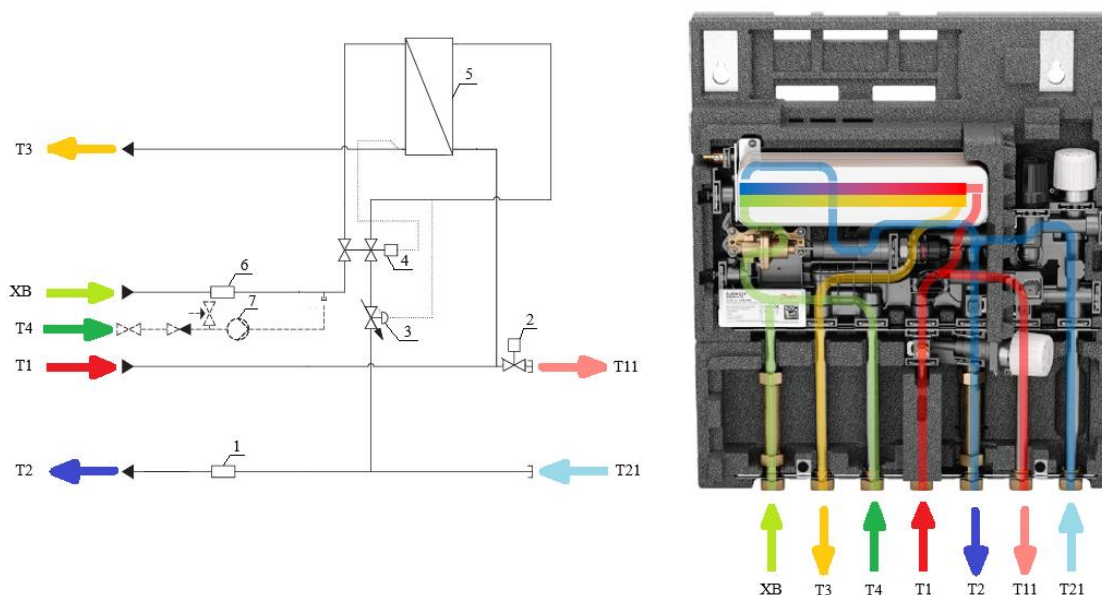


Рис.1.30 Принципова схема та зовнішній вигляд малого (квартирного) теплового пункту
1 – вузол обліку теплової енергії, 2 – комбінований регулювальний клапан з електроприводом, 3 – регулятор перепаду тиску, 4 – комбінований контролер гарячого водопостачання,

5 – мікропластинчатий теплообмінник, 6 – вузол обліку холодної води, 7 – насос рециркуляції.
Т1 – подавальний трубопровід теплової мережі, Т2 – зворотний трубопровід теплової мережі, Т11 – подавальний трубопровід системи забезпечення мікроклімату, Т21 – зворотний трубопровід системи забезпечення мікроклімату, Т3 – в систему ГВП, Т4 – циркуляційний трубопровід, ХВ – холодне водопостачання.

Сучасні МТП та КТП в Україні поступово стають більш компактними та менш металомісткими завдяки інноваційному використанню полімерних матеріалів, таких як поліфеніленсульфід (PPS) і полівініліденфторид (PVDF), які демонструють високу стійкість до високих температур, агресивних хімічних середовищ і механічних навантажень. Застосування таких композитів у ключових елементах МТП/КТП — теплообмінниках, регулювальних клапанах, корпусах насосів та стандартних з'єднувальних вузлах — дозволяє знизити залежність від металів (наприклад, міді, алюмінію чи нержавіючої сталі), що стикаються з обмеженнями через виснаження родовищ і екологічні обмеження, а також зменшити вагу, спростити транспортування, установку та обслуговування систем. Це сприяє розвитку модульних конструкцій МТП/КТП, підвищуючи їхню гнучкість, енергоефективність і адаптивність до інтеграції з

ЦТ, зокрема в контексті переходу до 4ПЦТ і інтеграції ВДЕ, що є актуальним для України з її застарілою інфраструктурою.

Перспективи впровадження МТП/КТП

МТП/КТП сприяють зниженню температур у внутрішньобудинкових системах, що дозволяє зменшити теплові втрати та підвищити ефективність використання теплової енергії. Це особливо актуально в умовах зниження теплових потреб будівель, розвитку низькотемпературних систем ЦТ та зростання ролі ВДЕ. Окрім цього, такі рішення спрощують інтеграцію локальних джерел енергії, зокрема теплових насосів або скидного тепла, що може використовуватися як поряд із будівлею, так і всередині неї.

Попри переваги, впровадження МТП/КТП в Україні стикається з низкою бар'єрів, серед яких:

- високі капітальні витрати на модернізацію теплових пунктів і внутрішньобудинкових систем;
- технічні обмеження існуючої інфраструктури, зокрема недостатні гідравлічні параметри, дисбаланс теплової мережі та потреба у додатковій автоматизації;
- відсутність фінансових стимулів для операторів ЦТ, що обмежує їхню зацікавленість у впровадженні інноваційних рішень;
- низька обізнаність споживачів щодо потенційних переваг таких систем.

Попри існуючі обмеження, МТП/КТП є перспективним рішенням для підвищення енергоефективності та інтеграції ВДЕ в системи ЦТ. Однак для їх широкомасштабного впровадження необхідно здійснити модернізацію теплових мереж, удосконалити нормативно-правову базу та підвищити кваліфікацію персоналу, що займається проєктуванням, експлуатацією та обслуговуванням таких систем.

1.3 Фізико-математичне моделювання теплових потоків та тепломасообмінних процесів в елементах конструкції теплових пунктів.

Даний розділ присвячений фізико-математичному моделюванню теплових потоків та тепломасообмінних процесів в елементах конструкції ІТП, з акцентом на аналіз роботи ІТП, приєднаного за залежною схемою з використанням змішувальної перемички. У такій схемі температура та витрата теплоносія в системі опалення безпосередньо залежать від параметрів теплової мережі, що вимагає високої точності регулювання та оптимізації для забезпечення енергоефективності та надійності. Система включає сучасні регулювальні пристрої, такі як регулятор перепаду тиску та регулювальний клапан з електроприводом, які спільно обмежують витрату теплоносія та стабілізують гідравлічні та теплові умови. Використання змішувальної перемички замість традиційного теплообмінника дозволяє зменшити гідравлічні втрати та підвищити гнучкість системи, однак її вплив на загальну продуктивність ІТП потребує детального теоретичного та експериментального аналізу. Така схема є конструктивно простішою та економічно вигіднішою, але має свої недоліки, які описані в попередніх розділах.

Актуальність даного дослідження зумовлена зростаючою потребою в енергоефективних і надійних рішеннях для систем ЦТ, особливо в умовах змінних навантажень, коливань параметрів теплової мережі та впливу зовнішніх факторів, таких як температура навколишнього середовища. Залежна схема приєднання, попри свою простоту, є вразливою до гідравлічних дисбалансів і теплових втрат, що робить необхідним створення точної математичної моделі для прогнозування її поведінки в реальних умовах експлуатації. Результати цього моделювання стануть основою для подальшого фізичного експерименту, описаного в наступному розділі дисертації, який дозволить верифікувати теоретичні висновки та оцінити практичну ефективність ІТП із змішувальною перемичкою.

Метою цього розділу є розробка та аналіз фізико-математичної моделі ІТП із залежною схемою приєднання, яка враховує конструктивні особливості

системи, принципи роботи її компонентів та взаємодію з тепловою мережею. На основі теоретичних розрахунків і аналізу ключових параметрів, таких як теплові потоки, гідравлічні втрати та енергоефективність, буде оцінено вплив сучасних регулювальних систем і змішувальної перемички на продуктивність ІТП. Отримані результати моделювання не лише сприятимуть оптимізації конструкції теплових пунктів, але й забезпечать теоретичну базу для фізичного експерименту, спрямованого на підтвердження або уточнення математичних моделей у реальних умовах.

Основні припущення моделі

Перед формуванням диференціальних рівнянь зробимо наступні припущення:

- Теплоносій є однорідним рідким середовищем з питомою теплоємністю c і густиною ρ ;
- Потік є стаціонарним або квазістаціонарним, із незначними динамічними змінами;
- Трубопроводи можуть не мати теплоізоляції, тому теплові втрати враховуються через конвекцію в повітря з коефіцієнтом теплопровідності $k_{\text{оточення}}$;
- Гідравлічні втрати описуються за законом Дарсі-Вейсбаха з коефіцієнтом тертя f .

Диференціальні рівняння для тепломасообмінних процесів

Рівняння збереження маси

Для стаціонарного потоку в трубопроводах і змішувальній перемичці рівняння неперервності має вигляд:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v) = 0 \quad (1.1)$$

Оскільки потік стаціонарний ($\frac{\partial \rho}{\partial t} = 0$) і густина ρ є сталою, рівняння спрощується до:

$$\nabla \cdot (\rho v) = 0 \quad (1.2)$$

У однорідному трубопроводі з постійним перетином:

$$pvA = \text{const} \quad (1.3)$$

де:

p – густина теплоносія, кг/м^3 (характеризує масу одиниці об'єму рідини);

v – вектор швидкості потоку, м/с (описує напрямок і величину руху теплоносія);

A – площа перетину трубопроводу, м^2 (геометрична характеристика трубопроводу).

Рівняння збереження енергії (теплові потоки):

Теплові процеси в ІТП описуються рівнянням енергії для теплоносія:

$$pc \left(\frac{\partial T}{\partial t} + v \cdot \nabla T \right) = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q_{\text{джерело}} \quad (1.4)$$

Для стаціонарного потоку ($\frac{\partial T}{\partial t} = 0$) і однорідного теплоносія (теплопровідність теплоносія k мала порівняно з конвекцією):

$$pcv \cdot \nabla T = Q_{\text{джерело}} \quad (1.5)$$

де $Q_{\text{джерело}}$ – джерело або втрати тепла. Тепловий потік визначається як:

$$Q = mc(T_{\text{out}} - T_{\text{in}}) \quad (1.6)$$

Для змішування:

$$T_{\text{out}}(t) = \frac{m_1(t)T_1 + m_2(t)T_2}{m_1(t) + m_2(t)}$$

[1.7]

де:

c – питома теплоємність теплоносія, $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ (кількість енергії, потрібної для нагрівання 1 кг теплоносія на 1 К);

T – температура теплоносія, $^{\circ}\text{C}$ або К (характеризує тепловий стан системи);

k – коефіцієнт теплопровідності теплоносія, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ (для води — малий, тому часто ігнорується);

$Q_{\text{джерело}}$ – джерело або втрати тепла, Вт (може включати теплові втрати через стінки або теплопередачу);

m – масова витрата теплоносія, кг/с (загальна або часткова для потоків);

T_1, T_2 – температури вхідних потоків (гарячого і охолодженого), $^{\circ}\text{C}$ або К ;

$T_{\text{out}}, T_{\text{in}}$ – вихідна і вхідна температури, $^{\circ}\text{C}$ або К ;

$m_1(t), m_2(t)$ — масові витрати теплоносія в подавальному та зворотному трубопроводах, кг/с.

Теплові втрати через стінки труб:

$$\frac{\partial Q_{\text{втрати}}}{\partial x} = -k_{\text{оточення}} \cdot P \cdot (T - T_{\text{оточення}}) \quad (1.8)$$

де:

$k_{\text{оточення}}$ — коефіцієнт теплопровідності оточуючого середовища (наприклад, повітря), Вт/(м·К);

P — периметр трубопроводу, м ($P = \pi D$, де D — діаметр труби);

$T_{\text{оточення}}$ — температура оточуючого середовища, °С або К.

Рівняння збереження імпульсу (гідравлічні втрати)

Гідравлічні втрати в трубопроводах і змішувальній перемичці описуються рівнянням Нав'є—Стокса для стаціонарного ламінарного або турбулентного потоку:

$$\rho(v \cdot \nabla)v = -\nabla P + \mu \nabla^2 v + \rho g \quad (1.9)$$

Для простоти використовуємо рівняння Дарсі-Вейсбаха для оцінки перепаду тиску:

$$\frac{\partial P}{\partial x} = -f \cdot \frac{\rho v^2}{2D} \quad (1.10)$$

Інтегруючи по довжині труб (L — довжина трубопроводу):

$$\Delta P = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{\rho v^2}{2} \quad (1.11)$$

де:

P — тиск, Па (характеризує гідравлічний стан системи);

μ — динамічна в'язкість теплоносія, Па·с (впливає на тертя);

g — вектор прискорення вільного падіння, м/с² (зазвичай ігнорується в горизонтальних трубах);

f — коефіцієнт тертя (безрозмірний, залежить від типу труб і режиму потоку);

D — діаметр трубопроводу, м;

L — довжина трубопроводу, м;

ΔP — перепад тиску, Па.

У змішувальній перемичці додаткові втрати ($\Delta P_{\text{перемичка}}$) враховуються як локальний опір, який додається до лінійних втрат:

$$\Delta P_{\text{перемичка}} = \zeta \cdot \frac{\rho v^2}{2} \quad (1.12)$$

де ζ – коефіцієнт локального опору (залежить від конструкції перемички).

Рівняння масообміну

Масообмін у системі мінімальний, оскільки теплоносії є однорідним (вода). Однак, якщо враховувати можливе виділення газів або домішок, можна використати рівняння дифузії:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + v \cdot \nabla C = D \nabla^2 C \quad (1.13)$$

Для стаціонарного стану ($\frac{\partial C}{\partial t} = 0$) і відсутності значного масообміну ($D \approx 0$):

$$v \cdot \nabla C = 0 \quad (1.14)$$

де:

C – концентрація домішок, кг/м³ або мол/м³ (характеризує склад теплоносія);

D – коефіцієнт дифузії, м²/с (впливає на перенесення маси).

Рівняння для динаміки температури та витрати

Регулювальні пристрої, зокрема електронний регулятор і двоходовий регулювальний клапан з електроприводом, коригують загальну витрату теплоносія на вході в систему опалення після змішувальної перемички, щоб підтримувати вихідну температуру $T_{out}(t)$ на рівні, заданому залежно від зовнішньої температури $T_{зовнішня}$. У змішувальній перемичці відбувається змішування потоку в подавальному трубопроводі T_1 з потоком охолодженого теплоносія зі зворотки T_2 у пропорціях, визначених співвідношенням витрат $m_1(t)$ і $m_2(t)$, де $m(t) = m_1(t) + m_2(t)$. Температурний графік визначається лінійною залежністю $T_{\text{задана}}$ від $T_{\text{зовнішня}}$. Ця залежність реалізується через пропорційно-інтегральний (PI) механізм регулювання температури, який враховує поточне відхилення температури та її інтегральне накопичення з часом. Динаміку температури $T_{out}(t)$ моделюємо диференціальним рівнянням першого порядку:

$$\frac{dT_{out}(t)}{dt} = -\frac{1}{\tau} \left(T_{out}(t) - T_{задана}(T_{зовнішня}) \right) + K_p \cdot e(t) + K_i \cdot \int e(t) dt \quad (1.15)$$

де:

$T_{out}(t)$ – вихідна температура теплоносія в часі після змішувальної перемички, °C;

τ – часова константа системи, що відображає інерційність теплоносія та регулювального пристрою, с;

$T_{задана}(T_{зовнішня})$ – задана температура, яка залежить від зовнішньої температури за лінійним графіком;

$e(t) = T_{задана}(T_{зовнішня}) - T_{out}(t)$ – відхилення температури, °C;

K_p – пропорційний коефіцієнт регулювання температури;

K_i – інтегральний коефіцієнт регулювання температури;

$\int e(t) dt$ – інтеграл відхилення з часом.

Температура після змішування в перемичці визначається відповідно до рівняння 1.7. Двоходовий регулювальний клапан на вході в систему опалення коригує загальну витрату $m(t)$, щоб досягти $T_{out}(t)$, близької до $T_{задана}$, адаптуючись до змін зовнішньої температури.

Вплив регулятора перепаду тиску

Регулятор перепаду тиску прямої дії стабілізує різницю тисків на регулювальній ділянці, обмежуючи максимальну витрату теплоносія та працюючи спільно з двоходовим регулювальним клапаном для підтримання гідравлічної стабільності системи. Це дозволяє компенсувати коливання тиску в тепловій мережі та запобігти надмірним витратам. Регулятор працює за пропорційним (Р) принципом, реагуючи лише на поточне відхилення перепаду тиску. Динаміку витрати $m(t)$ моделюємо диференціальним рівнянням:

$$\frac{dm(t)}{dt} = K_p \cdot (\Delta P_{задана} - \Delta P_{реальний}) - \frac{1}{\tau_v} m(t) \quad (1.16)$$

де:

K_p – пропорційний коефіцієнт регулювання для тиску, кг/(с·Па);

$\Delta P_{задана}$ – задана різниця тисків, Па;

$P_{\text{реальный}}$ —реальний перепад тиску, Па;

τ_v —часова константа клапана, с.

Регулятор перепаду тиску прямої дії забезпечує швидку реакцію на відхилення ΔP , стабілізуючи витрату $m(t)$ шляхом пропорційного впливу на двоходовий клапан.

Запропонована модель дозволяє комплексно описати теплові потоки, гідравлічні втрати та масообмін у системі ІТП із залежною схемою приєднання. Диференціальні рівняння враховують вплив автоматизованих систем регулювання на стабільність параметрів теплоносія, зокрема температури та витрат, забезпечуючи адаптацію до змін зовнішніх умов. Модель враховує теплові втрати через трубопроводи та гідравлічні втрати, спричинені робочими елементами системи, що дозволяє оцінити енергоефективність і стабільність роботи ІТП.

Вихідні дані з диференціальних рівнянь

Диференціальні рівняння, описані раніше, базуються на законах збереження маси, енергії та імпульсу для ІТП із залежною схемою приєднання та змішувальною перемичкою. Для переходу до звичайних рівнянь спрощуємо ці рівняння, припускаючи стаціонарний режим роботи, однорідність теплоносія та лінійність процесів у трубопроводах. Це дозволяє оцінити ключові параметри системи, такі як теплова потужність, ефективність, теплові та гідравлічні втрати. Основними завданнями є:

- Визначення теплового балансу системи;
- Оцінка ефективності роботи ІТП залежно від змін зовнішніх умов;
- Аналіз втрат тепла в трубопроводах та гідравлічних характеристик потоків.

Математична модель теплового балансу.

1. Тепловий баланс ІТП можна записати як:

$$Q_{\text{вх}} = Q_{\text{опалення}} + Q_{\text{втрати}} \quad (1.17)$$

де:

$Q_{\text{вх}}$ —теплова потужність, що надходить із зовнішньої мережі;

$Q_{\text{опалення}}$ — теплова потужність, передана системі опалення;

$Q_{\text{втрати}}$ —втрати тепла в трубопроводах.

2. Теплова потужність на вході в систему:

$$Q_{\text{вх}} = m \cdot c_p \cdot (T_{\text{вх}} - T_{\text{вих}}) \quad (1.18)$$

де:

m — масова витрата теплоносія (кг/с);

c_p —питома теплоємність води (≈ 4.18 кДж/(кг·К));

$T_{\text{вх}}$ —температура теплоносія на вході (°С);

$T_{\text{вих}}$ —температура теплоносія на виході (°С).

3. Теплове навантаження системи опалення:

Теплове навантаження $Q_{\text{опалення}}$ залежить від зовнішньої температури $T_{\text{зов}}$ і розраховується за емпіричною залежністю:

$$Q_{\text{опалення}} = Q_{\text{ном}} \cdot \frac{T_{\text{вн}} - T_{\text{зовн}}}{T_{\text{вн}} - T_{\text{зовн.ном}}} \quad (1.19)$$

де:

$Q_{\text{ном}}$ —номінальне теплове навантаження (Вт), визначене для розрахункових умов;

$T_{\text{вн}}$ —задана температура в приміщенні (наприклад, 20°С);

$T_{\text{зовн.ном}}$ —номінальна зовнішня температура (наприклад, -22°С).

4. Втрати тепла в трубопроводах:

Втрати тепла через теплопровідність і конвекцію в трубопроводах:

$$Q_{\text{втр}} = U \cdot A \cdot (T_{\text{сер}} - T_{\text{вн}}) \quad (1.20)$$

де:

U — коефіцієнт теплопередачі (Вт/(м²·К));

A — площа поверхні трубопроводу (м²);

$T_{\text{сер}} = \frac{T_{\text{под}} + T_{\text{зворот}}}{2}$ — середня температура теплоносія в трубопроводі (°С).

Гідравлічна модель

Для оцінки потоків теплоносія використаємо рівняння Бернуллі в модифікованій формі з урахуванням втрат тиску:

$$\frac{\Delta P}{\rho} + \frac{v^2}{2} + g \cdot \Delta z = h_f \quad (1.21)$$

де:

ΔP – перепад тиску (Па);

ρ – густина теплоносія (кг/м³);

v – швидкість потоку (м/с);

g – прискорення вільного падіння (9.81 м/с²);

Δz – різниця висот (м);

h_f – втрати напору через тертя, розраховані за формулою Дарсі-Вейсбаха:

$$h_f = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2g} \quad (1.22)$$

де:

f – коефіцієнт тертя (залежить від числа Рейнольдса);

L – довжина трубопроводу (м);

D – діаметр трубопроводу (м).

5. Оцінка ефективності системи

Ефективність ІТП можна визначити як відношення корисної теплової потужності до вхідної:

$$\eta = \frac{Q_{\text{опалення}}}{Q_{\text{вх}}} \quad (1.23)$$

Нижче наведений розрахунок виконано на основі теоретичних та експериментальних даних, детальний опис яких подано в наступному розділі. Метою розрахунку є аналіз теплових потоків залежно від зовнішньої температури, оцінка ефективності роботи ІТП та дослідження його гідравлічних характеристик. Окрім того, приділено увагу оцінці впливу змішування теплоносія в залежній схемі на робочі параметри системи.

Математичне моделювання реалізовано в середовищі MATLAB, що дозволяє отримати графічні візуалізації основних залежностей, зокрема змін потужності, температурних режимів та ефективності системи. Використання

цього підходу сприяє глибшій інтерпретації результатів та забезпечує можливість їх подальшої верифікації.

Дані для розрахунку:

Номинальна потужність: $Q_{\text{ном}} = 140 \text{ кВт}$ при $T_{\text{зовн}} = -22^\circ\text{C}$.

Температурний графік: $T_{\text{вх}}=90^\circ\text{C}$, $T_{\text{вих}} = 70^\circ\text{C}$ при $T_{\text{зовн}} = -22^\circ\text{C}$, лінійна залежність до $T_{\text{вх}}=10^\circ\text{C}$ при $T_{\text{зовн}} = +15^\circ\text{C}$.

Витрата: $m = 1,72 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$.

Трубопроводи: Сталеві, неізолювані, довжина $L = 4,58 \text{ м}$, діаметр $D = 50 \text{ мм} = 0,05 \text{ м}$, температура в приміщенні $T_{\text{вн}} = 16^\circ\text{C}$.

Змішування: 50% (через перемичку), $\Delta T = 15^\circ\text{C}$.

Споживання насоса: $P_{\text{нас.факт}} = 150 \text{ Вт}$.

Реальна потужність виміряна в ході експерименту: $Q_{\text{опал.факт}} = 30,7 \text{ кВт}$ при $T_{\text{зовн}} = 2,5^\circ\text{C}$.

Реальні температури виміряні в ході експерименту: $T_{\text{вх.факт}}=45^\circ\text{C}$, $T_{\text{вих.факт}} = 38^\circ\text{C}$.

Коефіцієнт теплопередачі: $U = 10 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$.

Питома теплоємність: $c_p = 4,18 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} = 4180 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$.

Визначимо теплову потужність за номінальних умов відповідно до рівняння (1.18):

$$Q_{\text{вх}} = 1,72 \cdot 4180 \cdot \frac{90 - 70}{1000} \approx 143,8 \text{ кВт}$$

Втрати тепла до теплового лічильника в ІТП (ділянка в неопалюваному приміщенні) становлять 3,3 кВт, тому номінальна потужність системи опалення складає 140 кВт. Визначимо втрати тепла в самому ІТП (через неізолювані сталеві трубопроводи) відповідно до рівняння (1.20):

$$A = \pi \cdot D \cdot L = \pi \cdot 0,05 \cdot 4,58 \approx 0,718 \text{ м}^2$$

$$T_{\text{серед}} = \frac{90 + 70}{2} = 80^\circ\text{C}$$

$$Q_{\text{втр}} = 10 \cdot 0,718 \cdot \frac{80 - 16}{1000} \approx 0,459 \text{ кВт}$$

Відповідно до рівняння (1.17) можна розрахувати тепловий баланс:

$$Q_{\text{вх}} = 140 + 0,459 + 3,3 = 143,8 \text{ кВт}$$

Оскільки втрати 3,3 кВт знаходяться за межами балансової приналежності та не належать до встановленого ІТП, вони не враховуються при розрахунку ефективності. Ділянка неізованих сталевих трубопроводів, що безпосередньо належить до ІТП, не має теплоізоляції, оскільки система виконує роль діючого демонстраційного стенду, який використовується для навчальних цілей. Розрахуємо ефективність відповідно до рівняння (1.23):

$$\eta = \frac{140}{140,46} = 99,7\%$$

При $T_{\text{зовн}} = 2,5^\circ\text{C}$:

Розрахуємо теплове навантаження $Q_{\text{опалення}}$ відповідно до рівняння (1.19):

$$Q_{\text{опалення}} = 140 \cdot \frac{20-2,5}{20-(-22)} \approx 58,33 \text{ кВт}$$

Розрахункова температура в подавальному ($T_{\text{вх.розрахункова}}$) та зворотному ($T_{\text{вих.розрахункова}}$) трубопроводах відповідно до $T_{\text{зовн}} = 2,5^\circ\text{C}$ та температурного графіку буде становити:

$$T_{\text{вх.розрахункова}} = 90 - \frac{80}{37} \cdot (2,5 + 22) \approx 37,03^\circ\text{C}$$

Врахуємо змішування, що впливає на витрату в контурі опалення для досягнення необхідної потужності (прийmemo ступінь відкриття регулювального клапану з електроприводом 50%, а $\Delta T = 15^\circ\text{C}$).

$$T_{\text{вих.розрахункова}} = 37,03 - 15 = 22,03^\circ\text{C}$$

Розрахунковий ступінь відкриття регулювального клапана з електроприводом при $T_{\text{зовн}} = 2,5^\circ\text{C}$ буде становити 44,12% з $\Delta T = 13,2^\circ\text{C}$.

Розрахуємо масову витрату, відповідно до отриманих значень:

$$m_{\text{теор}} = \frac{58,33 \cdot 1000}{4180 \cdot 13,2} = 1,06 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$$

Так як ІТП встановлено в приміщенні, де постійно підтримується температура $T_{\text{вн}} = 16^\circ\text{C}$ визначимо теплові втрати:

$$Q_{\text{втр}} = 10 \cdot 0,718 \cdot \frac{33,5 - 16}{1000} \approx 0,104 \text{ кВт}$$

Визначимо ефективність:

$$Q_{\text{вх}} = 58,33 + 0,126 = 58,43 \text{ кВт}$$

$$\eta = \frac{58,33}{58,46} = 99,8\%$$

Виконаємо розрахунок на основі реальних даних, отриманих у ході експерименту.

Реальна потужність виміряна в ході експерименту: $Q_{\text{опал.факт}} = 30,7 \text{ кВт}$ при $T_{\text{зовн}} = 2,5^\circ\text{C}$.

Реальні температури виміряні в ході експерименту: $T_{\text{вх.факт}} = 45^\circ\text{C}$, $T_{\text{вих.факт}} = 38^\circ\text{C}$.

Витрата в контурі опалення:

$$m_{\text{реал}} = \frac{30,09 \cdot 1000}{4180 \cdot 7} = 1,03 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$$

Так як ІТП встановлено в приміщенні, де постійно підтримується температура $T_{\text{вн}} = 16^\circ\text{C}$ визначимо теплові втрати:

$$Q_{\text{втр}} = 10 \cdot 0,718 \cdot \frac{41,5 - 16}{1000} \approx 0,183 \text{ кВт}$$

$$Q_{\text{вх}} = 30,7 + 0,183 = 30,9 \text{ кВт}$$

Визначимо ефективність:

$$\eta = \frac{30,7}{30,9} = 99,4\%$$

Виконаємо гідравлічний розрахунок відповідно до параметрів розробленої експериментальної моделі ІТП:

Швидкість потоку.

Площа поперечного перерізу труби:

$$A_{\text{поп}} = \pi \cdot \left(\frac{D}{2}\right)^2 = 0,00196 \text{ м}^2$$

Густина води (ρ) при середній температурі $T_{\text{сер}} = 41,5^\circ\text{C}$: $\rho \approx 990 \text{ кг/м}^3$.

Швидкість при номінальних параметрах ($m = 1,06 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$):

$$v_{\text{теор}} = \frac{m}{p \cdot A_{\text{поп}}} = \frac{1,06}{990 \cdot 0,00196} \approx 0,55 \text{ м/с}$$

Швидкість при параметрах отриманих в ході експерименту ($m = 1,03 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$):

$$v_{\text{реал}} = \frac{m}{p \cdot A_{\text{поп}}} = \frac{1,03}{990 \cdot 0,00196} \approx 0,53 \text{ м/с}$$

Число Рейнольдса:

В'язкість води при $T_{\text{сер}} = 41,5^\circ\text{C}$: $\mu = 0,65 \cdot 10^{-3}$

$$Re = \frac{p \cdot v \cdot D}{\mu}$$

При номінальних параметрах:

$$Re = \frac{990 \cdot 0,55 \cdot 0,05}{0,65 \cdot 10^{-3}} = 41,88$$

При параметрах, отриманих в ході експерименту:

$$Re = \frac{990 \cdot 0,53 \cdot 0,05}{0,65 \cdot 10^{-3}} = 40,36$$

Потік турбулентний ($Re > 4000$).

Коефіцієнт тертя. Для турбулентного потоку використовуємо формулу Коула-Брука (наближено): $f \approx 0,025$ (для гладких труб при такому Re). Довжина вторинного контуру ІТП, до якого приєднана система опалення $L = 2,52$ м враховуючи змішувальну перемичку.

Розрахуємо втрати напору, які треба врахувати при виборі циркуляційного насосу разом з втратами в приєднуваній систему опалення відповідно до рівняння (1.22):

При номінальних параметрах:

$$h_f = 0,025 \cdot \frac{2,52}{0,05} \cdot \frac{0,55^2}{2 \cdot 9,81} \approx 0,0194 \text{ м}$$

При параметрах, отриманих в ході експерименту:

$$h_f = 0,025 \cdot \frac{2,52}{0,05} \cdot \frac{0,53^2}{2 \cdot 9,81} \approx 0,0180 \text{ м}$$

Перепад тиску на ділянці, що відноситься до ІТП.

$$\Delta P = p \cdot g \cdot h_f$$

При номінальних параметрах:

$$\Delta P = 990 \cdot 9,81 \cdot 0,0194 \approx 188,5 \text{ Па}$$

При параметрах, отриманих в ході експерименту:

$$\Delta P = 990 \cdot 9,81 \cdot 0,0180 \approx 174,8 \text{ Па}$$

На Рис. 1.31 представлено результати чисельного моделювання ІТП із залежною схемою підключення та 50% змішуванням теплоносія, отримані на основі проведених розрахунків. Моделювання виконано в програмному середовищі MATLAB із використанням як теоретичних розрахунків, так і експериментальних даних (код для використання в MATLAB наведено в Додатку А). Дослідження охоплює оцінку теплових потоків, температурних режимів і ефективності системи опалення в діапазоні зовнішніх температур від -22°C до 15°C . Основну увагу приділено аналізу роботи ІТП у реальних умовах експлуатації, зокрема за зовнішньої температури $2,5^{\circ}\text{C}$, для якої отримано експериментальні дані, що дозволяють порівняти теоретичні результати з реальними показниками.

Аналіз отриманих результатів можна розділити на три основні частини:

Теплові потоки. Номінальна потужність опалення ($Q_{\text{ном}}$) лінійно зменшується зі зростанням зовнішньої температури, що відповідає фізичним принципам: при вищих ($T_{\text{зовн}}$) потреба в опаленні зменшується. При $T_{\text{зовн}} = 2,5^{\circ}\text{C}$, теоретична потужність становить 58,43 кВт, тоді як реальна — лише 30,9 кВт. Це може свідчити про нижчу теплову потребу будівлі в реальних умовах, наприклад, через кращу теплоізоляцію або меншу площу опалення (в даному випадку впливає сукупність факторів – тепла ізоляція будівлі, система вентиляції з можливістю повітряного опалення та інтелектуальна система керування опалювальними приладами).

Теплові втрати ($Q_{\text{втр}}$) залишаються відносно низькими у всьому діапазоні температур, так як площа відкритих ділянок трубопроводів невелика через модульну конструкцію ІТП.

Вхідна потужність ($Q_{\text{вх}}$) незначно перевищує корисну через наявність теплових втрат.

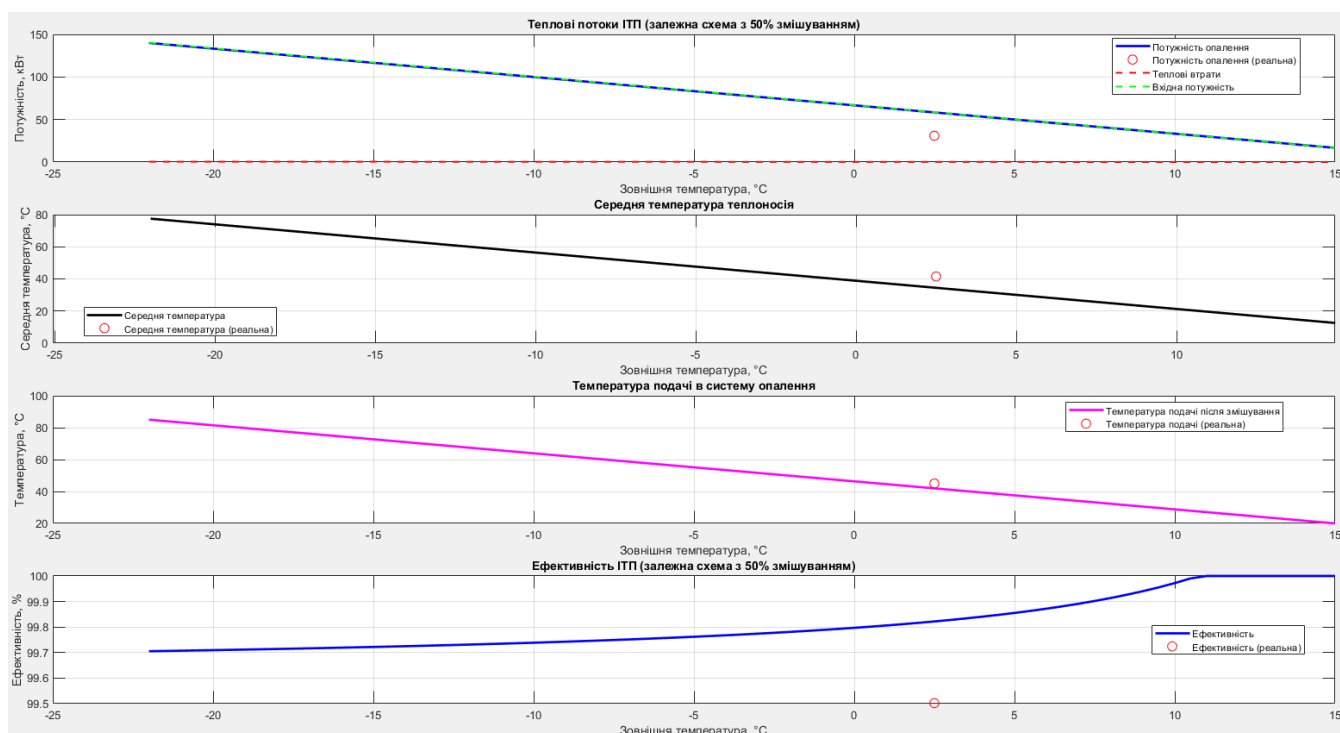


Рис.1.31 Результати чисельного моделювання роботи ІТП відповідно до номінальних параметрів та параметрів, отриманих в результаті фізичного експерименту

Температурні режими. Середня температура теплоносія ($T_{\text{сер}}$) і температура подачі після змішування ($T_{\text{вх.факт}}$) демонструють лінійну залежність від $T_{\text{зовн}}$, що відповідає температурному графіку системи. Теоретичні значення температури подачі ($37,03^{\circ}\text{C}$) нижчі за реальні (45°C), що зумовлено пропорційним регулюванням в широкому діапазоні температур на стороні джерела тепла. Реальна температура подачі вказує на те, що система працює з вищою температурою теплоносія, ніж передбачено теоретичною моделлю, що спричинено вищими температурами в первинному контурі.

Ефективність. Ефективність ІТП залишається високою ($> 99\%$) у всьому діапазоні температур, що свідчить про низькі теплові втрати в системі. Зростання ефективності при вищих $T_{\text{зовн}}$ пояснюється зменшенням теплових втрат через меншу різницю температур між теплоносієм і навколишнім середовищем.

Реальна ефективність(99,5 %) трохи нижча за теоретичну(99,8 %) через вищі теплові втрати, пов'язані з вищою середньою температурою теплоносія в реальних умовах.

Для подальшого аналізу роботи ІТП із залежною схемою підключення було розроблено модель у середовищі Simulink. Ця модель базується на даних температури зовнішнього повітря за 24 години, отриманих від електронного регулятора під час фізичного експерименту в ІТП, а також на основі його налаштувань. Такий підхід дозволив відтворити динамічну поведінку системи опалення, враховуючи реальні коливання зовнішніх умов і параметри регулювання, що забезпечило більш точне моделювання теплових і гідравлічних характеристик.

Зображення, представлене на Рис.1.32, ілюструє структурну схему моделі, розробленої в Simulink. Основні елементи схеми включають:

- Блок "Т зовнішня": Джерело вхідних даних, яке подає інформацію про температуру зовнішнього повітря отриману в ході експерименту;
- Блок "Температурний графік": Цей блок реалізує температурний графік системи опалення, визначаючи температуру подачі теплоносія на основі зовнішньої температури. Він моделює лінійну залежність температури подачі від зовнішньої температури;
- Блок «ECL Comfort 310»: Реалізує пропорційно-інтегральний регулятор, який налаштований для стабілізації температури подачі на основі відхилення від заданої уставки;
- Блок "Система опалення": Фільтр нижніх частот із часовою константою, що відповідає 10 хвилин (600 секунд), який згладжує швидкі коливання сигналу, що надходить від регулятора. Цей блок моделює динамічну поведінку системи опалення з урахуванням її інерційних характеристик;
- Блок "Т внутрішня" із значенням 20: Задає бажану температуру в приміщенні (уставку) для регулювання системи.

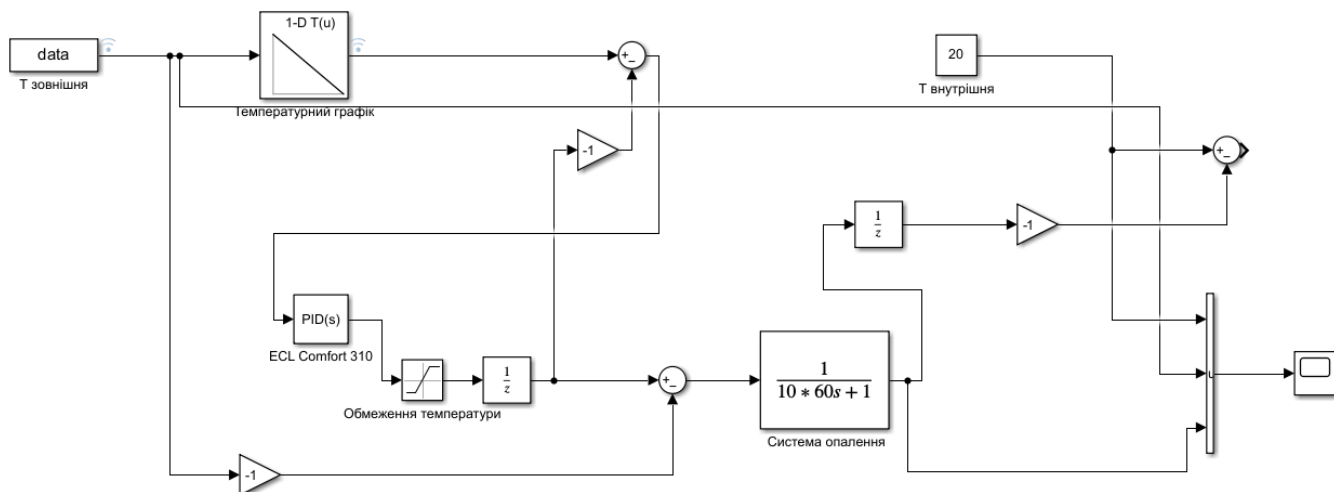


Рис. 1.32 Структурна схема моделі Simulink для аналізу роботи ІТП із залежною схемою, що включає температурний графік, зовнішню температуру за 24 години передану до ПІ-регулятора Danfoss ECL Comfort 310 та інерційні характеристики системи опалення.

На представленому графіку (Рис. 1.33) відображено результати моделювання динамічної роботи ІТП із залежною схемою підключення, отримані на основі розробленої моделі в середовищі Simulink. Графік ілюструє взаємозв'язок між зовнішньою температурою, температурою подачі теплоносія та температурою в приміщенні протягом 24-х годинного часового інтервалу, позначеного на осі абсцис. Ось ординат відображає температуру в градусах Цельсія ($^{\circ}\text{C}$).

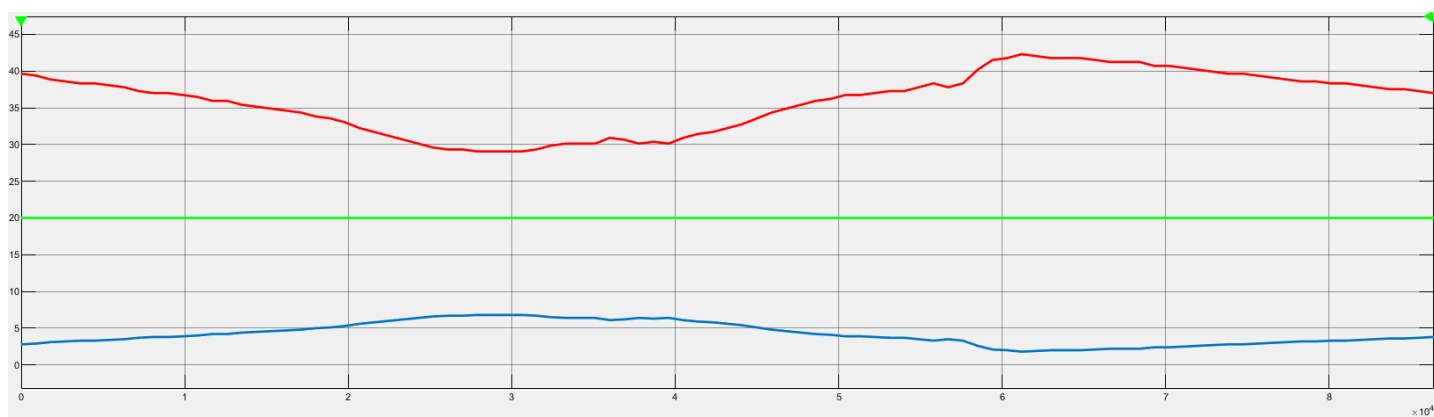


Рис. 1.33 Динаміка роботи ІТП: залежність температури подачі (червона лінія), температури в приміщенні (зелена лінія) та зовнішньої температури (синя лінія) від часу, отримана за моделлю Simulink.

Опис графіка.

Зовнішня температура (синя лінія): Ця крива демонструє зміни температури зовнішнього повітря протягом часу. Вона характеризується загальним

зниженням із періодичними коливаннями, що відповідає типовим добовим або погодним змінам, зареєстрованим під час фізичного експерименту.

Температура подачі (червона лінія): Ця крива відображає температуру теплоносія на подачі в систему опалення. Спостерігається чітка залежність: зі зниженням зовнішньої температури температура подачі зростає, що свідчить про коректну роботу регулятора, який адаптує теплову потужність до зовнішніх умов. У проміжку часу (приблизно з 15 до 18 години) спостерігається локальний максимум, що вказує на пікове навантаження в даний проміжок часу.

Температура в приміщенні (зелена лінія): Ця горизонтальна лінія, розташована на рівні приблизно 20°C, відображає задану уставку температури в приміщенні. В даному випадку, ця температура є усередненим показником, що задається під час налагодження електронного регулятора.

Розроблена модель у MATLAB і Simulink продемонструвала високу точність у відтворенні теплових, гідравлічних і динамічних характеристик ІТП, що підтверджується близькістю теоретичних і реальних значень температури, ефективності та потужності. Однак для повної валідації моделі та її практичного застосування необхідне експериментальне дослідження, яке дозволить врахувати реальні умови експлуатації, уточнити параметри моделі та оптимізувати роботу системи опалення. Подальші експерименти сприятимуть підвищенню енергоефективності ІТП і розробці рекомендацій для практичного впровадження.

1.4. Експериментальні дослідження теплотехнічних характеристик теплових пунктів.

Метою цієї частини розділу є перевірка коректності розробленої моделі ІТП із залежною схемою підключення шляхом порівняння теоретичних результатів, отриманих у попередній частині розділу, із експериментальними даними, отриманими в реальних умовах експлуатації. Окрім того, передбачається оцінка енергоефективності системи опалення, включаючи аналіз

споживаної електричної та теплової енергії, для підтвердження практичної доцільності запропонованої конструкції.

Завданням є:

- підібрати основне обладнання для ІТП, яке відповідає отриманим технічним вимогам від постачальника тепла;
- налаштувати електронний регулятор для забезпечення роботи системи відповідно до температурного графіка;
- організувати підключення тепло- та електролічильників через M-Bus для збору даних про споживання енергії;
- провести експериментальні вимірювання теплових і гідравлічних характеристик ІТП;
- проаналізувати отримані дані та порівняти їх із теоретичними результатами.

Підбір обладнання:

1. В якості електронного регулятора було обрано ECL Comfort 310, оскільки він реалізує PI-регулювання, що забезпечує стабільне керування температурою теплоносія відповідно до температури зовнішнього повітря. Завдяки підтримці трипозиційного управління електроприводами регулюючих клапанів, регулятор забезпечує точне та енергоефективне регулювання витрати теплоносія. Крім того, ECL Comfort 310 має можливість інтеграції з тепло- та електролічильниками через M-Bus, що дозволяє здійснювати моніторинг енергоспоживання та аналіз ефективності роботи теплового пункту в тому числі завдяки швидкій інтеграції в існуючі SCADA-системи;

2. Для забезпечення необхідної витрати теплоносія 1,72 л/с (6,19 м³/год) та компенсації втрат напору 47 кПа, у було обрано насос Wilo Stratos 32/1-12. Цей насос оснащений електронним регулюванням швидкості обертання, що дозволяє адаптувати його продуктивність відповідно до змін теплового навантаження. Завдяки вбудованому частотному регулюванню, насос забезпечує оптимізацію енергоспоживання та стабільність гідравлічного режиму, що сприяє підвищенню ефективності роботи теплового пункту;

3. В якості пристрою для обліку електричної енергії було обрано електролічильник ABB B21 з інтерфейсом M-Bus, що забезпечує точний облік електроенергії, споживаної насосом та іншими електричними компонентами теплового пункту. Завдяки можливості інтеграції в систему моніторингу, лічильник дозволяє автоматизовано збирати дані про споживання електроенергії, що є критично важливим для аналізу енергоефективності ІТП;

4. В якості приладу обліку теплової енергії було обрано MULTICAL 602 у комплекті з ультразвуковим витратоміром DN40 ULTRAFLOW 65-5-CJAJ, встановленим на подавальному трубопроводі, та датчиками температури Pt 500. Даний лічильник забезпечує високоточний вимір витрати теплоносія, температурного перепаду та обчислення споживаної теплової енергії. Інтеграція модуля M-Bus дозволяє передавати дані в систему моніторингу, що забезпечує автоматизований контроль ефективності роботи теплового пункту.

5. В якості датчиків температури в складі регулятора теплового потоку обрано комплектні датчики Pt 1000, а саме ESMТ та ESMU-100, що забезпечують точний контроль температурних параметрів у системі тепlopостачання та інтегруються з електронним регулятором ECL Comfort 310 без необхідності їх калібрування:

- Датчик ESMТ застосовується для вимірювання температури зовнішнього повітря;
- Датчики ESMU-100 у комплекті з гільзами використовуються для вимірювання температури теплоносія в ключових точках системи – подавальний трубопровід перед ІТП, подавальний трубопровід системи опалення та зворотний трубопровід на виході з системи опалення.

6. Для вибору регулюючого клапана з електроприводом та регулятора перепаду тиску необхідно виконати гідравлічний розрахунок на основі параметрів системи тепlopостачання:

Підбір діаметру регулювального клапану:

$$dy_{min} = \sqrt{\frac{4 \times G \times 1000}{3,6 \times \pi \times \vartheta_{max}}} \quad (\text{мм}) \quad (1.24)$$

де: G - об'ємна витрата теплоносія через регулювальний клапан, м³/год;

ϑ_{max} - швидкість теплоносія, м/с;

$\pi = 3,14$;

dy_{min} - мінімальний діаметр клапану, отриманий в ході розрахунку, мм;

$dy_{кл}$ - номінальний діаметр обраного клапану, мм;

Вибираємо діаметр клапану із умови $dy_{кл} > dy_{min}$

$$dy_{min} = \sqrt{\frac{4 \times G \times 1000}{3,6 \times \pi \times \vartheta_{max}}} = 27,02 \text{ де найближчим є } DN32$$

Визначаємо реальну швидкість потоку, що проходить через регулювальний клапан:

$$\vartheta = \frac{4 \times G \times 1000}{3,6 \times \pi \times dy^2} \quad (\text{м/с}) \quad (1.25)$$

Значення повинно бути не більше ніж 3 м/с для регулювальних клапанів діаметр яких не перевищує 50 мм, та менше ніж 3,5 м/с для регулювальних клапанів більшого діаметра;

$$\vartheta = \frac{4 \times 6,19 \times 1000}{3,6 \times \pi \times 32^2} = 2,14 \quad (\text{м/с})$$

Так як необхідно забезпечити лінійне регулювання теплового потоку при залежному приєднанні обрано регулювальний клапан VB2, DN32, $kvs = 16$ м³/год. Даний клапан має наближену до лінійної характеристику (комбінована або лінійно-лінійна характеристика), що дозволяє забезпечити стабільне та передбачуване керування витратою теплоносія відповідно до змінних теплових навантажень.

Втрата тиску на повністю відкритому регулювальному клапані при розрахунковій об'ємній витраті визначається за наступною формулою:

$$\Delta P_{кл} = \left(\frac{G}{k_{vs}} \right)^2 \quad (\text{бар}) \quad (1.26)$$

де: k_{vs} - максимальна пропускна здатність обраного регулювального клапану, м³/год.

При розрахунку регулювального клапану отримані втрати тиску і є значенням необхідного налаштування регулятора перепаду тиску з урахуванням, що

імпульс береться відразу після регулювального клапану (саме таке підключення імпульсної трубки є найкращим).

$$\Delta P_{\text{кл}} = \left(\frac{6,19}{16} \right)^2 = 0,15 \text{ (бар)}$$

Відповідно до значень, отриманих під час розрахунку за формулами (1.24) та (1.26), попередньо можна обрати регулятор перепаду тиску – AVP, DN32, різьове приєднання, монтаж на подавальному трубопроводі, $kvs - 10 \text{ м}^3/\text{год}$, діапазон налаштування перепаду тиску 0,05-0,5 бар, куди потрапляє раніше розраховане значення 0,15 бар. Значення швидкості для цього діаметру клапану та витраті було раніше розраховано за формулою (1.25).

Визначимо втрати тиску на повністю відкритому клапані відповідно до (1.26):

$$\Delta P_{\text{кл}} = \left(\frac{6,19}{10} \right)^2 = 0,38 \text{ (бар)}$$

Визначення пропускної здатності регулювального клапану:

$$k_v = \frac{G}{\sqrt{\Delta P}}, \quad (\text{м}^3/\text{год}) \quad (1.27)$$

де ΔP :

- для регулятора перепаду тиску - надлишковий тиск, що спрацює на собі сам регулятор перепаду тиску щоб підтримати на регулювальному клапані розрахункову витрату.

Так як, згідно з технічними умовами перепад тиску перед ІТП (первинний контур) становить 100 кПа (1 бар), то надлишковий тиск становить 0,85 бар після розрахунку втрат тиску на регулювальному клапані з електроприводом.

$$k_v = \frac{6,19}{\sqrt{0,85}} = 6,7 \text{ (м}^3/\text{год)}$$

Визначимо ступінь відкриття регулятора перепаду тиску:

$$x = \frac{k_v}{k_{vs}} \cdot 100, \quad \% \quad (1.28)$$

де:

k_{vs} – максимальна пропускна здатність обраного регулювального клапану, $\text{м}^3/\text{год}$.

k_v – розрахункова пропускна здатність регулювального клапану, м³/год.

Отримане значення $[x]$ для всіх регуляторів тиску повинно бути більше 30%: $x \geq 30\%$

Ступінь відкриття немає необхідності визначати тільки у випадку, коли регулювальний клапан розраховується для подальшого застосування в індивідуальному тепловому пункті, а значенням необхідного налаштування регулятора перепаду тиску є втрати тиску на повністю відкритому клапані. У всіх інших випадка визначення ступеня відкриття для регулювальних клапанів та регуляторів тиску прямої дії є обов'язковим.

$$x = \frac{6,7}{10} \cdot 100 = 67\%$$

$$67\% \geq 30\%$$

Визначення максимально допустимого перепаду тиску на клапанах тиску (для запобігання кавітації):

$$\Delta P = z \cdot (P_{1s} - P_s) \quad (1.29)$$

де: z – фактор кавітації (це технічна характеристика регулювального клапану, яка наведена в технічному описі обраного клапану);

P_{1s} – абсолютний тиск перед клапаном, дорівнює $P_{1s} = P_1 + 1$, бар;

P_s – абсолютний тиск насичення водяної пари при наявній температурі теплоносія (табличне значення), бар.

$$\Delta P_{avp} = 0,55 \cdot (4 - 0,7) = 1,8 \geq 0,85$$

$$\Delta P_{avp} = 0,5 \cdot (3,15 - 0,7) = 1,2 \geq 0,15$$

Для недопущення виникнення кавітації, отримане значення ΔP_{max} повинно бути більшим за перепад тиску, який було використано при розрахунку пропускної здатності клапану.

7. Для керування регулюючим клапаном VB2 обрано електропривод AMV 20, який працює від мережевої напруги 230 В та використовує трипозиційний імпульсний сигнал для управління. Швидкість переміщення штоку 15 с/мм забезпечує плавне регулювання витрати теплоносія, що є критично важливим для стабільного підтримання параметрів в інерційних

системах опалення. Така характеристика дозволяє мінімізувати коливання температури та запобігає нестабільності в процесі регулювання теплового потоку.

8. Для запобігання несанкціонованому витоку теплоносія, а також для забезпечення надійної експлуатації системи, в складі ІТП було передбачено встановлення запірної арматури в ключових точках приєднання. Вибір конкретних моделей здійснювався відповідно до номінальних діаметрів трубопроводів, які з'єднують джерело тепла з системою опалення будівлі.

Крім того, для захисту елементів обладнання від механічних домішок у воді, на вводі теплоносія встановлено сітчастий фільтр FVF, який забезпечує попереднє очищення потоку. З метою запобігання зворотному потоку теплоносія передбачено встановлення зворотних клапанів у вузлах обв'язки насосів та на змішувальній перемичці. Це сприяє збереженню коректного гідравлічного балансу системи та унеможливорює паразитні перетоки. Усі зазначені елементи відображені на тривимірній моделі теплову пункту та чітко ідентифікуються на фактичному обладнанні, що представлено на Рис. 1.34.

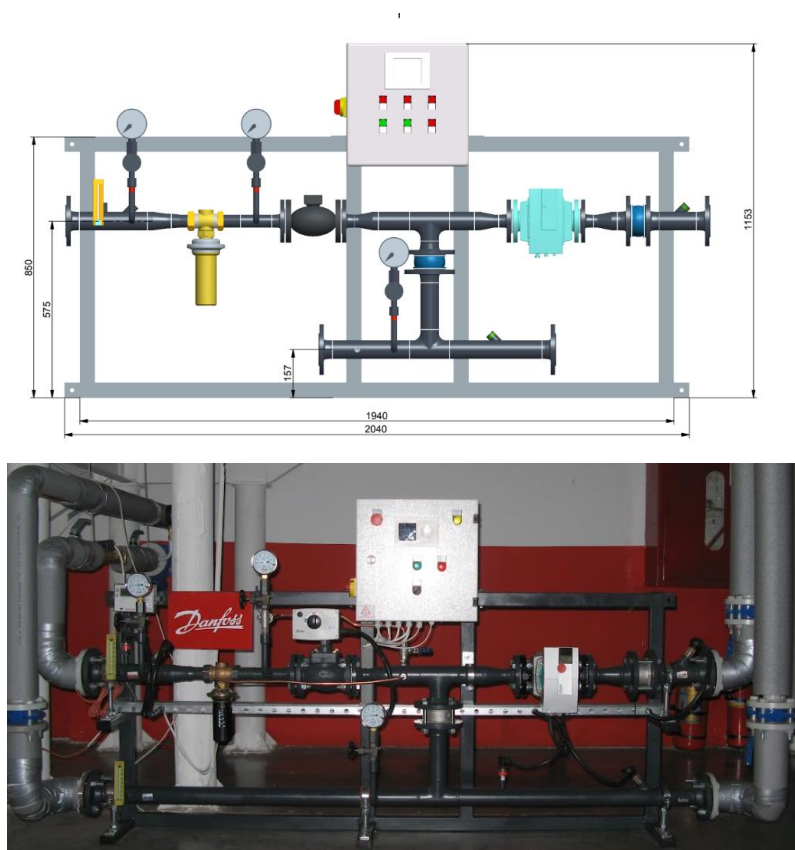


Рис.1.34 3D модель та встановлений ІТП на якому проводився експеримент

Налаштування електронного регулятора (контролера):

Для ефективної роботи системи опалення необхідно налаштувати електронний регулятор відповідно до температурного графіка. Це забезпечить автоматичне регулювання температури теплоносія залежно від зовнішніх умов, оптимізуючи енергоспоживання та підтримуючи стабільний тепловий режим у системі. Застосуємо наступні налаштування:

Контур 1: Опалення

Режим роботи: Робота в комфортному режимі

Потрібна температура (комфортний режим): 20.0 °C

Температура подачі при зовнішніх температурах (°C)

Нахил температурного графіку - 1.0 (Рис. 1.35)

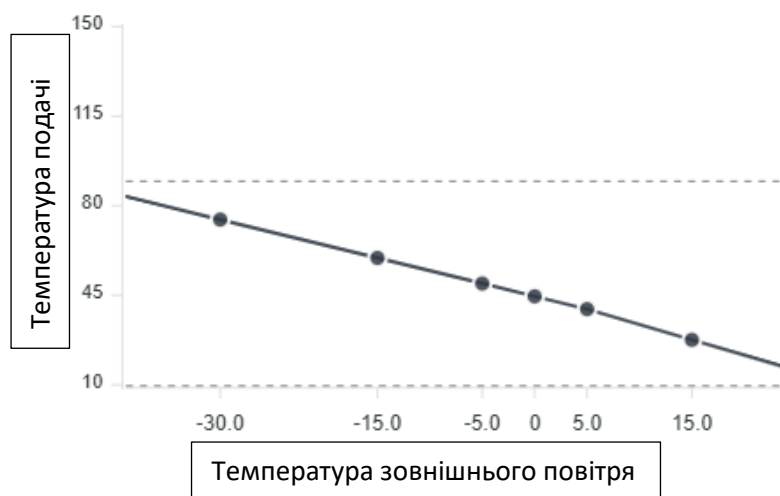


Рис. 1.35 Температурний графік заданий при налаштуваннях електронного регулятора ECL Comfort

310

Максимальна температура подачі - 90.0 °C

Мінімальна температура подачі - 20.0 °C

Темп. графік 80.0 °C (-30 °C)

Темп. графік 64.0 °C (-15 °C)

Темп. графік 53.0 °C (-5 °C)

Темп. графік 47.0 °C (0 °C)

Темп. графік 42.0 °C (5 °C)

Темп. графік 31.0 °C (15 °C)

Оптимізація

Автозахист - (-15.0 °C)

Оптимізація - 30.0

Літо, відключ. - 14.0 °C

Параметри керув.

Захист привода 10.0 m

Хр Зона пропорц. - 120.0 K

Постійна часу інтегрування - 540.0 s

Час роботи 150.0 s

Nz (Нейтральна зона) 3.0 K

Керування насосом

Час затримки для переключення - 60.0 s

Час повтору при аварії - 5.0 m

Час стабілізації при включенні - 90.0 s

Зміна, тривалість днів - 7.0

Час перемикання Роб/Рез годин - 10.0

Насос тренув. влітку - 60.0 s

Розклад (Режими комфорту)

Понеділок:

05:00 – 18:00

Вівторок – п'ятниця:

07:00 – 18:00

M-bus (підключені лічильники енергії)

Лічильник енергії 1

Адреса 208.0

Тип – Тепловий лічильник

Час сканування 3600.0 s

Лічильник енергії 2

Адреса 50.0

Тип – Електричний лічильник

Час сканування 3600.0 s

Інші налаштування, не зазначені в описі, не використовуються та не впливають на хід експерименту.

Підключення тепло- та електролічильників:

Для збору даних про споживання енергії необхідно підключити тепло- та електролічильник до електронного регулятора через M-Bus. Це дозволить здійснювати автоматичний моніторинг параметрів споживання та їх подальший аналіз.

Процес налаштування включає:

- Підключення лічильників до клем 37 та 38 панелі регулятора;
- Використання системного Меню регулятора для активації M-Bus;
- Виконання команди SCAN у розділі меню "Система" – M-Bus config

для автоматичного виявлення всіх підключених пристроїв.

Даний етап є ключовим для коректного збору експериментальних даних та подальшого аналізу ефективності роботи системи.

Експериментальні вимірювання теплових і гідравлічних характеристик ІТП:

Для оцінки роботи ІТП необхідно провести вимірювання основних теплових та гідравлічних параметрів, що визначають ефективність його функціонування.

Перелік вимірюваних параметрів (дата проведення експерименту 03.03.2024):

1. Температурні параметри (вимірювання 8:00):
 - Температура теплоносія на вході в ІТП – 50,8 °С;
 - Температура після вузла змішування – 44,9 °С;
 - Температура на зворотному трубопроводі – 41,2 °С;
 - Температура зовнішнього повітря – 3,5 °С;
 - Температура яка повинна підтримуватись – 44,3 °С.
2. Гідравлічні параметри (вимірювання 8:00):
 - Витрата теплоносія - 2,2 м3/год;

- Перепад тиску на регулюючому клапані – 0,17 бар;
 -
 - Перепад тиску між подавальним та зворотним трубопроводами теплової мережі – 0,78 бар;
 - Перепад тиску між подаючим і зворотним трубопроводами системи опалення – 0,3 бар.
3. Енергетичні параметри (вимірювання 8:00):
- Споживана електроенергія насосом – 153,0 Вт;
 - Споживана енергія електронним регулятором та електроприводом – 10,6 Вт;
 - Передана теплова енергія за показами теплотічильника – 24400 Вт;
 - Отримана теплова енергія за показниками датчиків температури та витрати насосу – 23900 Вт (витрата 5,55 м³/год відображається на насосі).

Під час експерименту було проведено аналіз роботи ІТП на основі вимірюваних параметрів, зокрема температури подачі, зворотного трубопроводу та теплової потужності (Рис. 1.36). Отримані результати дозволяють оцінити ефективність регулювання та стабільність роботи системи.

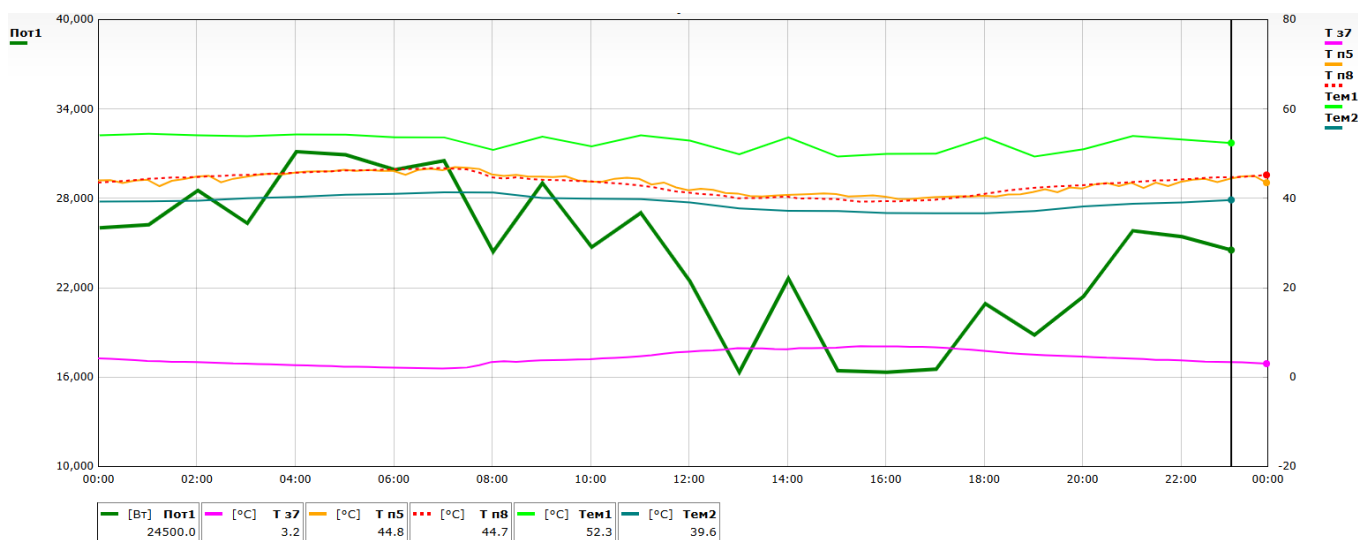


Рис. 1.36 Робота ІТП під час експерименту 03.03.2024 в режимі реального часу з використанням веб-сервісу для віддаленого керування ECL Portal.

Для поглибленого аналізу було виконано порівняння з моделлю Simulink (Рис. 1.33), що дає змогу оцінити відповідність реальної системи до теоретичних

розрахунків, виявити можливі відхилення та причини їх виникнення, а також розробити рекомендації для покращення роботи ІТП.

Аналіз експериментального графіку:

Пурпурна лінія - температура зовнішнього повітря, має незначні зміни протягом доби, з тенденцією до зниження у ранкові години та незначного підвищення ввечері;

Помаранчева лінія - фактична температура подачі, демонструє поступові коливання протягом дня, але в цілому залишається стабільною;

Червона пунктирна лінія - задана температура подачі, яка розрахована електронним регулятором;

Зелена лінія – фактична теплова потужність (Вт), де коливання теплової потужності зумовлені зміною споживання;

Світло-зелена лінія – температура подачі (за даними теплолічильника);

Блакитно-зелена лінія – температура зворотного теплоносія (за даними теплолічильника).

Загальні тенденції зміни температури подачі співпадають з моделлю в Simulink, хоча в реальній системі коливання значно приглушені порівняно з моделлю за рахунок глибших налаштування оптимізації та PI-коефіцієнтів. В реальній системі застосована нейтральна зона регулювання, що зменшує реакцію на швидкі зміни. У Simulink регулятор більш чутливо реагує на зміну зовнішніх умов, тоді як у реальному експерименті спостерігається більш плавна динаміка. Загалом, обидва графіки показують стабільну роботу системи, проте реальна система має більш згладжену реакцію через гідравлічну інерційність та можливі особливості налаштувань регулятора. Електронний регулятор ефективно підтримує задану температуру подачі, хоча фактична температура (за теплолічильником) демонструє більші відхилення.

1.5 Висновки

У ході дослідження проведено комплексний аналіз розвитку систем ЦТ, зокрема еволюції теплових пунктів, та їх ролі в підвищенні енергоефективності теплових мереж. Проведене моделювання в середовищі Simulink, а також експериментальні випробування підтвердили ефективність сучасних ІТП і їх перспективність у контексті переходу до низькотемпературних теплових мереж 4ПЦТ.

Згідно з проведеним аналізом, ЦТ є основою енергетичної інфраструктури міст, забезпечуючи стабільне і кероване постачання тепла. Водночас його розвиток потребує врахування сучасних тенденцій, включаючи інтеграцію ВДЕ, зменшення теплових втрат та цифровізацію управління. Аналіз європейських нормативних вимог, зокрема оновленої Директиви EU/2023/1791, підтверджує необхідність трансформації сектору теплопостачання та поступового переходу до високоефективних низькотемпературних рішень, що включають використання скидного тепла та теплових насосів.

Історичний аналіз розвитку теплових пунктів показав поступову відмову від ЦТП на користь більш автономних та ефективних ІТП. Традиційні квартальні ЦТП, що використовувалися в системах 2ПЦТ, мають ряд недоліків, включаючи високі теплові втрати, значні експлуатаційні витрати та обмежену можливість регулювання параметрів теплоносія. Введення РТП у системах 3ПЦТ частково вирішило ці проблеми, проте справжнім проривом у підвищенні ефективності стало впровадження автоматизованих ІТП. Українські системи ЦТ досі характеризуються домінуванням рішень другого та, частково, третього покоління, що вимагає масової модернізації та поступового переходу до 4ПЦТ.

Проведене фізико-математичне моделювання теплових потоків у середовищі Simulink дозволило дослідити роботу ІТП в різних режимах експлуатації. Верифікація моделі на основі експериментальних даних підтвердила її високу точність, оскільки відхилення температурних показників не перевищували 5%. Аналіз роботи регуляторів показав, що РІ-регулятор ефективно підтримує заданий температурний режим, однак реальна інерційність

системи вимагає додаткового врахування у моделях прогнозного управління. Виявлено також, що у фізичному експерименті перепад тиску на ІТП виявився дещо вищим за розрахунковий ($\approx 8\%$), що може бути наслідком додаткових гідравлічних втрат у реальних умовах.

Проведене експериментальне дослідження підтвердило ефективність впровадження автоматизованих алгоритмів керування, що дозволяють оптимізувати балансування теплових потоків та підвищити енергоефективність роботи ІТП. Особливо перспективним є використання 2Н-ІТП, які дозволяють не тільки споживати, а й передавати надлишкове тепло назад у мережу, що сприяє зниженню пікових навантажень і покращенню загального енергетичного балансу системи.

Загалом, проведені дослідження демонструє високу ефективність поєднання чисельного моделювання та фізичних експериментів для аналізу теплових процесів в ІТП. Отримані результати можуть бути використані для подальшої оптимізації роботи ІТП та розробки рекомендацій щодо їх масового впровадження в Україні. Подальші розділи цієї роботи будуть присвячені детальному аналізу функціональних можливостей 2Н-ІТП, їхньому впливу на балансування теплових потоків, а також техніко-економічним аспектам впровадження таких рішень у сучасних теплових мережах. Окрему увагу буде приділено інтеграції відновлюваних джерел енергії та практичному застосуванню моделі просьюмера, яка активно розвивається в європейських країнах як стратегічний підхід до децентралізованого теплопостачання.

РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА ПРИНЦИПОВОЇ СХЕМИ ТА ФІЗИКО-МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ДВОНАПРАВЛЕНОГО ТЕПЛОВОГО ПУНКТУ

2.1 Розробка схеми двонаправленого теплового пункту

Одним з найважливіших напрямків розвитку сучасних систем ЦТ є впровадження ефективних рішень, які забезпечують гнучке регулювання теплових потоків та інтеграцію локальних відновлюваних джерел енергії. Класичним та поширеним варіантом такого регулювання є застосування ІТП, які адаптують параметри теплоносія централізованої тепломережі до конкретних потреб споживача шляхом регулювання температури та гідравлічних режимів.

Традиційні схеми ІТП зазвичай реалізуються в залежному або незалежному виконанні, що детально описано в попередньому розділі. Для незалежних ІТП характерне використання теплообмінника для гідравлічного розділення первинного контуру тепломережі та вторинного контуру споживача. Регулювання температури теплоносія, що подається в систему опалення, виконується за допомогою двоходового регулювального клапана, а циркуляція теплоносія у внутрішньому контурі забезпечується циркуляційним насосом. Такі класичні схеми ІТП за своєю суттю однонаправлені, оскільки тепла енергія надходить виключно в одному напрямку – від централізованої мережі до кінцевого споживача.

Разом з тим, зростання потреб в енергоефективності, гнучкості управління тепловими навантаженнями та розвитку ВДЕ створило передумови для поступового вдосконалення традиційних ІТП. Наступним етапом їх розвитку стали комбіновані індивідуальні теплові пункти (К-ІТП), в яких ЦТ поєднується з локальними ВДЕ, такими як теплові насоси або сонячні колектори. Подальшим логічним кроком цього розвитку є перехід до двонаправлених індивідуальних теплових пунктів (2Н-ІТП), особливістю яких є можливість не тільки комбінувати джерела тепла, але й передавати накопичене надлишкове тепло назад у централізовану мережу, забезпечуючи тим самим балансування теплових навантажень та реалізацію концепції просьюмера.

Запропонована концепція 2Н-ІТП базується на одночасному використанні двох джерел енергії – основного у вигляді ЦТ та локального додаткового джерела, що може бути представлено у вигляді ВДЕ або джерела скидного тепла. Така конфігурація дозволяє не тільки отримувати тепло з централізованої мережі, а й акумулювати, перерозподіляти та експортувати теплову енергію, забезпечуючи ефективне балансування навантажень у системі.

На Рис.2.1 наведена принципова схема 2Н-ІТП. Основним (базовим) джерелом у цій схемі виступає система ЦТ, з якої нагріта вода надходить до споживача через двоходовий регулювальний клапан (1). Після проходження теплообмінника (2), теплоносій циркуляційним насосом (3) подається у внутрішню систему опалення споживача, де віддає тепло радіаторам або іншим опалювальним пристроям (4).

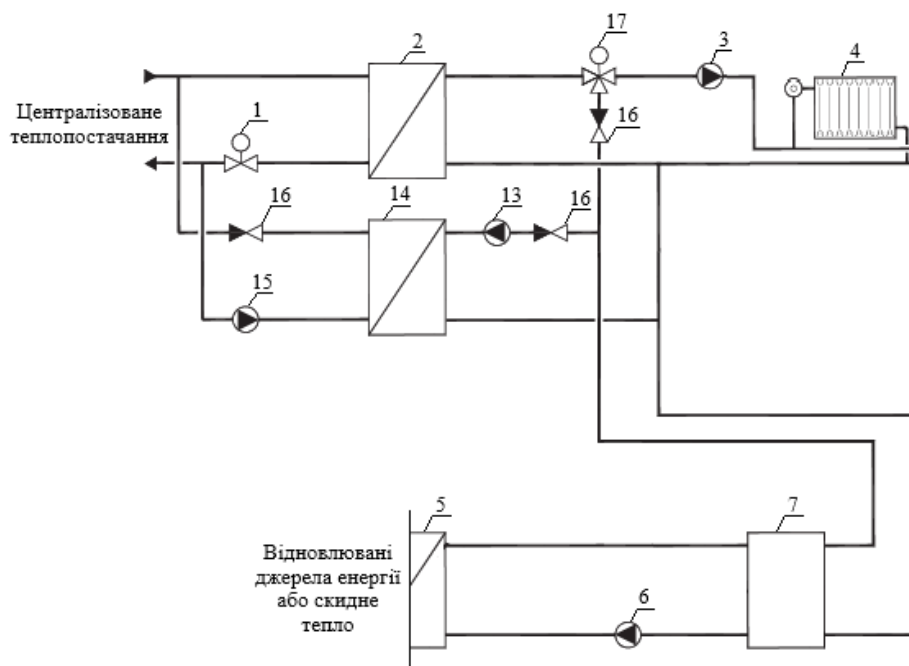


Рис.2.1 Принципова схема двонаправленого індивідуального теплового пункту (2Н-ІТП)

Водночас, поряд з системою ЦТ, паралельно працює локальне ВДЕ або джерело скидного тепла (пріоритетне джерело), що приєднане до теплообмінника (5), який може бути застосований в залежності від типу джерела і параметрів системи. Циркуляція теплоносія між джерелом (приєднаним до теплообмінника (5) або безпосередньо до баку) підтримується насосом (7). Тепло, отримане від локального ВДЕ або джерела скидного тепла, накопичується в баку-акумуляторі

(8), що забезпечує стабілізацію температури та можливість накопичення енергії для подальшого використання. Застосування бака-акумулятора також є необхідним через те, що локальне ВДЕ або джерело скидного тепла, може працювати переривчасто або нерівномірно залежно від зовнішніх умов (наприклад, погодних умов, режиму роботи обладнання тощо). Завдяки акумуляції система отримує можливість гнучкого управління запасами енергії та забезпечення стабільності теплопостачання споживача, а також зниження пікових навантажень. Акумуляована теплова енергія може використовуватись у внутрішньому контурі системи опалення, куди вона подається через клапан (17), що забезпечує необхідні параметри температури теплоносія для опалювальних приладів споживача.

Ключовою особливістю цієї схеми є можливість передачі надлишкової теплової енергії назад до мережі ЦТ. У випадку, коли акумуляоване тепло в баку перевищує поточні потреби споживача, активуються насоси (13 та 15), і теплоносій через додатковий теплообмінник (14) направляється назад до централізованої теплової мережі. Зворотні клапани (16), встановлені у схемі, призначені для запобігання небажаному зворотному руху теплоносія, що дозволяє забезпечити коректний напрямок потоків теплоносія та уникнути гідравлічних порушень у системі.

Таким чином, запропонована схема 2Н-ІТП дозволяє реалізувати три основні режими роботи:

- Режим споживання тепла від системи ЦТ (традиційний режим роботи ІТП) – тепло для системи опалення повністю або частково надходить з мережі ЦТ;
- Режим комбінованого виробництва (ЦТ + локальне джерело) – тепло для покриття потреб системи опалення надходить одночасно від двох джерел, оптимально балансує навантаження між системою ЦТ та локальним джерелом;
- Режим рекуперації тепла до системи ЦТ – надлишкова теплова енергія, що генерується локальним джерелом, акумулюється та продається

(повертається) назад у мережу ЦТ, сприяючи зменшенню пікових навантажень і покращенню загального енергетичного балансу.

Таким чином, ключовими елементами, що забезпечують ефективну роботу 2Н-ІТП, є теплообмінники, локальне ВДЕ або джерело скидного тепла, бак-акумулятор, система насосів та регулюючих клапанів, що керуються інтелектуальним електронним регулятором (контролером), який забезпечує оптимальне управління потоками тепла відповідно до динамічних потреб споживача та умов роботи тепломережі.

Під час розробки схеми було проаналізовано три найбільш розповсюджені варіанти локальних джерел теплової енергії: теплові насоси, сонячні колектори та джерела скидного тепла. Робота 2Н-ІТП здійснюється за принципом пріоритетності місцевого джерела: у разі наявності локального виробництва тепла, першочергово покриваються потреби споживача за рахунок власної генерації. Якщо виробництво тепла перевищує поточні потреби споживача, надлишкова тепла енергія може передаватися назад у мережу ЦТ через окремий теплообмінник. При відключенні або недостатній генерації від локального джерела, система автоматично перемикається на традиційний режим роботи, отримуючи тепло від системи ЦТ.

В першій конфігурації, де застосовується тепловий насос (ТН) як локальне джерело енергії, передбачається використання установок типу «повітря-вода», геотермальних систем або типу «вода-вода». Робота теплового насоса базується на ефективному перетворенні низькопотенційного тепла, отриманого з навколишнього повітря, ґрунту чи інших доступних джерел, у тепло з достатньо високим температурним потенціалом, що придатне для використання в системах опалення.

У періоди, коли теплоспоживання будівлі є незначним або відсутнє (наприклад, у нічні години чи під час міжсезоння), ТН може генерувати теплову енергію у надлишку. Цей надлишок, завдяки наявності двонаправленого з'єднання з системою ЦТ, має можливість бути переданим назад до мережі.

Таким чином, система сприяє вирівнюванню навантажень у тепломережі та зменшенню пікових навантажень на джерела ЦТ.

В другій конфігурації, де застосовуються сонячні колектори як локальне джерело енергії, передбачається розміщення геліоколекторів (плоских або вакуумних) на дахах, фасадах будівель або поряд з ними. Отримана сонячна теплова енергія використовується для нагрівання теплоносія в локальному контурі, після чого через теплообмінник тепло передається у внутрішню систему опалення будівлі. Завдяки цьому споживачі можуть суттєво скоротити відбір тепла з системи ЦТ в сонячні періоди, особливо у міжсезоння.

При достатньо високій інтенсивності сонячного випромінювання може виникати ситуація, коли кількість отриманого тепла перевищує поточні потреби будівлі в опаленні. В цьому випадку надлишок теплової енергії акумулюється в баку-акумуляторі за тим же принципом, що і в попередній конфігурації з тепловим насосом, та передається назад до системи ЦТ.

Водночас головним обмеженням цього варіанту є нестабільність сонячної генерації, яка суттєво залежить від погодних умов і часу доби. Тому для надійного забезпечення потреб в опаленні необхідно обов'язково використовувати комбіновану схему, що передбачає додаткове залучення тепла від централізованої тепломережі у періоди низької сонячної активності або її відсутності.

В третій конфігурації, де локальним джерелом енергії є скидне тепло, передбачається утилізація теплоти, що виникає як побічний продукт роботи вентиляційних систем промислових та громадських будівель, а також медичних установ, промислових чи технологічних процесів, холодильного обладнання підприємств торгівлі або дата-центрів. Таке скидне тепло, як правило, має низький температурний потенціал і в традиційних схемах теплопостачання втрачається. Завдяки використанню теплонасосних установок можливо суттєво підвищити температурний потенціал цього тепла до рівня, придатного для забезпечення опалення будівель. В окремих випадках температурний діапазон дозволяє використати лише системи рекуперації.

При надлишковій генерації теплової енергії, яка перевищує потреби споживача, 2Н-ІТП надає можливість передачі цієї енергії до системи ЦТ. Таким чином, створюється додатковий ресурс для балансування загальних теплових навантажень у мережі. Подібні рішення особливо актуальні для об'єктів із великими обсягами постійних тепловиділень, наприклад дата-центрів, промислових підприємств або торговельних комплексів, які можуть стати важливими джерелами постачання скидного тепла у тепломережу міста.

Крім того, розробка схеми 2Н-ІТП супроводжувалась детальним аналізом характеристик традиційних схем ІТП, а також різних конфігурацій 2Н-ІТП із застосуванням типів локальних джерел, описаних вище. Такий порівняльний аналіз, наведений нижче у вигляді Таблиці 7, дає можливість більш глибокого розуміння переваг, недоліків та потенціалу кожної із схем для інтеграції в сучасні системи теплопостачання та оптимізації енергетичного балансу будівель.

Таблиця 7. Порівняльна таблиця характеристик ІТП та 2Н-ІТП

Критерій	Традиційний ІТП (залежна схема)	Традиційний ІТП (незалежна схема)	2Н-ІТП з тепловим насосом	2Н-ІТП з сонячними колекторами	2Н-ІТП з використанням скидного тепла
Джерело тепла	Тільки ЦТ	Тільки ЦТ	ЦТ + тепло від теплового насоса (ВДЕ, електроенергія)	ЦТ + сонячне тепло (ВДЕ, геліоколектори)	ЦТ + місцеве скидне тепло (утилізація)
Гнучкість 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 тепла в мережу ЦТ (режим рекуперації)	Ні – конструктивно не передбачений.	Ні – теплообмінник працює тільки в одному напрямку.	Так – тепловий насос може передавати надлишок в мережу ЦТ	Так – надлишок сонячного тепла в разі його наявності може надходити в мережу ЦТ	Так – скидне тепло 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 в залежності від його типу, зменшуючи споживання від ЦТ	Частково – в сонячні години зимового дня пікове навантаження зменшується, але вночі ні.	Так/Частково – скидне тепло 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 + контролер ТН. Необхідність в прогнозуванні та інтеграції в smart grid	Середній: автоматичне керування розподілом тепла 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 і кількості скидного тепла, в окремих випадках включаючи керування ТН
Стабільність тепло-ння	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 відключенні системи ЦТ 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 підключення.	Висока: два джерела (мережа + скидне тепло) підвищують надійність. Скидне тепло може повністю задовільнити попит.
Витрати на обслу-ння	Низькі: мінімум обладнання.	Помірні: потрібно обслуговування теплообмінника, більша кількість елементів	Вищі: обслуговування компресора, декількох теплообмінників, баку-акумулятора, системи автоматизації ТН.	Вищі: періодична перевірка колекторів, обслуговування декількох теплообмінників, баку-акумулятора, системи автоматизації та контролю за роботою колекторів.	Вищі: необхідне обслуговування теплообмінника, з'єднаного з контуром скидного тепла чи ТН, а також обслуговування декількох теплообмінників, баку-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 тепла нестабільним, але обладнання саме по собі просте і надійне.	Висока: джерело скидного тепла часто працює постійно. Висока надійність елементів в технологічному процесі (резервне живлення тощо).
Інтеграція 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 скидного тепла (при відповідному технічному оснащенні інженерної системи будівлі)

Таблиця 7 добре демонструє, що незалежна схема підключення традиційного ІТП є важливим етапом для подальшого розширення до 2Н-ІТП. У такій схемі застосовується теплообмінник, що забезпечує гідравлічне розділення мережі ЦТ та внутрішньобудинкової системи споживача. Це є важливим, оскільки у внутрішньому контурі 2Н-ІТП часто застосовуються спеціальні теплоносії, наприклад антифризи або інші суміші, які мають нижчу температуру кристалізації порівняно з водою. Крім того, використання теплових насосів або сонячних колекторів у 2Н-ІТП передбачає підтримання високої якості теплоносія, що складно забезпечити у відкритих, розгалужених мережах ЦТ. Саме тому незалежна схема підключення виступає необхідною передумовою для впровадження сучасних та перспективних рішень у теплопостачанні, які вимагають високої якості і стабільності параметрів теплоносія у внутрішніх контурах.

Таким чином, розроблена схема 2Н-ІТП демонструє високий потенціал для інтеграції ВДЕ та оптимізації роботи сучасних систем теплопостачання. Проте для ефективної практичної реалізації та більш глибокого аналізу запропонованого рішення необхідне подальше дослідження, яке повинно включати фізико-математичне моделювання теплових потоків та тепломасообмінних процесів у ключових компонентах системи, зокрема в теплообмінниках і акумуляторах теплоти.

Таке моделювання дозволить детально вивчити динаміку зміни температурних режимів, визначити ефективні алгоритми керування, уточнити параметри системи та оцінити її роботу в різних умовах експлуатації. Використання числових моделей у вигляді диференціальних рівнянь надасть можливість проводити прогнозні розрахунки та аналізувати вплив різних факторів на продуктивність і стабільність функціонування 2Н-ІТП. Отримані результати стануть науковим підґрунтям для подальшого розвитку концепції 2Н-ІТП, що сприятиме поширенню таких систем і реалізації сучасних підходів до управління тепловою енергією на рівні споживача.

2.2 Фізико-математичне моделювання теплових потоків і тепломасообмінних процесів в теплообмінниках і акумуляторах теплоти

Як зазначалося у попередніх розділах, прогнозовано, що 2Н-ІТП стануть відігравати важливу роль у підвищенні енергоефективності та інтеграції ВДЕ у ЦТ. Такі системи зможуть забезпечити не лише ефективне споживання тепла з мережі, але й передачу надлишкової теплової енергії, наприклад, від ВДЕ або джерел скидного тепла, назад у мережу, сприяючи гнучкості та оптимальному використанню ресурсів. Фізико-математичне моделювання теплових потоків і тепломасообмінних процесів у теплообмінниках і акумуляторах теплоти є важливим етапом аналізу й оптимізації роботи 2Н-ІТП перед проведенням фізичного експерименту. Моделювання дозволяє оцінити динаміку теплових процесів, визначити оптимальні режими роботи та прогнозувати ефективність передачі надлишкового тепла, що дає змогу знизити витрати на експериментальні дослідження та підвищити надійність впровадження таких систем у реальних умовах.

Метою моделювання є створення достовірної математичної моделі, яка відображає динаміку теплових процесів у 2Н-ІТП, враховуючи змінні зовнішні умови, режими роботи ВДЕ та взаємодію з акумулятором теплоти. Це дозволяє прогнозувати поведінку системи, визначати оптимальні параметри роботи (наприклад, температури, масові витрати теплоносія) та оцінювати ефективність передачі надлишкового тепла в мережу. Практичним результатом такого моделювання є можливість попереднього аналізу енергоефективності, виявлення потенційних проблем (наприклад, перегріву або недостатньої теплопередачі) і розробка рекомендацій для експериментального дослідження, що значно знижує витрати часу та ресурсів на фізичні випробування. Таким чином, моделювання забезпечує теоретичну основу для подальшого впровадження 2Н-ІТП у реальних умовах експлуатації.

Взаємодію основних компонентів 2Н-ІТП, представленого на Рис. 36, можна описати наступним чином:

1. Теплообмінник ЦТ (2): забезпечує передачу тепла від мережі ЦТ до системи опалення, підтримуючи необхідну температуру теплоносія в системі;
2. ВДЕ або джерело скидного тепла: нагріває теплоносії, який надходить у бак-акумулятор. Тепловий потік залежить від зовнішніх умов (інтенсивності сонячного випромінювання, температури зовнішнього повітря тощо) або доступності надлишкової теплової енергії;
3. Бак-акумулятор (7): накопичує теплову енергію, отриману від теплового насоса, сонячного колектора або джерела скидного тепла. З бака теплоносії розподіляється залежно від температури:
 - Через триходовий клапан M1 безпосередньо в систему опалення, якщо температура в баку досягає або перевищує встановлений поріг значення, розрахованого за встановленим на електронному регуляторі (контролері) температурним графіком;
 - На теплообмінник (14) для передачі надлишкового тепла в теплову мережу, якщо температура в баку перевищує критичне значення (наприклад, 48°C).
4. Теплообмінник контуру рекуперації (14): призначений для передачі надлишкової теплової енергії від бака-акумулятора у теплову мережу ЦТ, забезпечуючи двонаправлену взаємодію системи з мережею.

Для кількісного опису теплових процесів і тепломасообмінних взаємодій у 2Н-ІТП виразимо динаміку температур у системі диференціальних рівнянь. Ці рівняння враховують теплові потоки, теплові втрати та умови роботи кожного компонента системи, дозволяючи моделювати її поведінку за різних режимів експлуатації.

Припущення:

Теплоносії — вода ($c_p \approx 4.18 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$, $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$);

Масові витрати ($\dot{m}$) вважаємо відомими;

Втрати тепла в навколишнє середовище враховуються;

Температура зовнішнього повітря ($T_{\text{зовнішня}}(t)$) змінюється з часом.

Змінні в системі диференційних рівнянь:

$T_{\text{ЦТпод_НХ1}}$ – температура подачі ЦТ на вході в теплообмінник (2);

$T_{\text{ЦТзв_НХ1}}$ – температура зворотки ЦТ на виході з теплообмінника (2);

$T_{\text{inНХ1}}$ – температура подачі теплоносія в системі опалення;

$T_{\text{outНХ1}}$ – температура зворотного теплоносія від системи опалення;

$T_{\text{out_ТН}}$ – температура теплоносія на виході з теплового насоса;

$T_{\text{акум}}$ – температура в баку – акумуляторі (7);

$T_{\text{out_НХ2}}$ – температура теплоносія, що повертається в мережу ЦТ через теплообмінник контуру рекуперації (14).

1. Передача тепла від системи ЦТ через теплообмінник (2) до системи опалення визначається як:

$$pV_{\text{НХ1}}c_p \frac{dT_{\text{ЦТпод_НХ1}}}{dt} = \dot{m}_{\text{ЦТ}}c_p(T_{\text{ЦТпод_НХ1}} - T_{\text{ЦТзв_НХ1}}) - Q_{\text{НХ1}} - Q_{\text{втратЦТ_НХ1}} \quad (2.1)$$

де:

$V_{\text{НХ1}}$ – об'єм контуру ЦТ теплообмінника (2);

$Q_{\text{НХ1}}$ – тепловий потік, який передається від контуру ЦТ теплообмінника (2) до системи опалення.

$$Q_{\text{НХ1}} = U_{\text{НХ1}} \cdot A_{\text{НХ1}} \cdot \Delta T_{\text{НХ1}} \quad (2.2)$$

де:

$U_{\text{НХ1}}$ – коефіцієнт теплопередачі теплообмінника (2);

$A_{\text{НХ1}}$ – площа поверхні теплообміну;

$\Delta T_{\text{НХ1}}$ – середньологарифмічна різниця температур між контурами теплообмінника.

$$\Delta T_{\text{НХ1}} = \frac{(T_{\text{ЦТпод_НХ1}} - T_{\text{inНХ1}}) - (T_{\text{ЦТзв_НХ1}} - T_{\text{outНХ1}})}{\ln \left(\frac{T_{\text{ЦТпод_НХ1}} - T_{\text{inНХ1}}}{T_{\text{ЦТзв_НХ1}} - T_{\text{outНХ1}}} \right)} \quad (2.3)$$

$$Q_{\text{втратЦТ_НХ1}} = U_{\text{втратЦТ_НХ1}} \cdot A_{\text{втратЦТ_НХ1}} \cdot (\Delta T_{\text{ЦТНХ1}} - T_{\text{вн}}) \quad (2.4)$$

де:

$\Delta T_{\text{ЦТНХ1}} = \frac{T_{\text{ЦТпод_НХ1}} + T_{\text{ЦТзв_НХ1}}}{2}$ – середня температура теплоносія в трубопроводі;

$T_{\text{вн}}$ – температура в приміщенні, де розташовано обладнання.

Для системи опалення (вторинний контур теплообмінника (2) та потік від бака через регулювальний клапан М1):

$$pV_{\text{ОП}}c_p \frac{dT_{\text{inHX1}}}{dt} = \dot{m}_{\text{ОП}}c_p(T_{\text{inHX1}} - T_{\text{outHX1}}) + Q_{\text{HX1}} + Q_{\text{М1_акум}} - Q_{\text{ОП}} - Q_{\text{втратОП}} \quad (2.5)$$

де:

$V_{\text{ОП}}$ – об'єм теплоносія в системі опалення;

$Q_{\text{М1_акум}}$ – тепловий потік від бака через клапан М1:

$$Q_{\text{М1_акум}} = \dot{m}_{\text{М1_акум}}c_p(T_{\text{М1_акум}} - T_{\text{outHX1}}) \cdot f_{\text{М1}} \quad (2.6)$$

$f_{\text{М1}} = 1$, якщо $T_{\text{in_ОП}} \geq T_{\text{розрах}}$;

$f_{\text{М1}} = 0$, якщо $T_{\text{in_ОП}} < T_{\text{розрах}}$;

$Q_{\text{ОП}}$ – теплове навантаження системи опалення;

$$Q_{\text{втратОП}} = U_{\text{втратОП}} \cdot A_{\text{втратОП}} \cdot (T_{\text{серед_ОП}} - T_{\text{вн}})$$

$Q_{\text{втратОП}}$ – теплові втрати системи опалення;

$U_{\text{втратОП}}$ – коефіцієнт теплових втрат системи опалення;

$A_{\text{втратОП}}$ – площа поверхні, через яку відбуваються теплові втрати;

$T_{\text{серед_ОП}}$ – середня температура теплоносія в системі опалення.

2. Робота теплового насоса визначається як:

Тепловий насос нагріває теплоносії, який надходить у бак:

$$pV_{\text{НР}}c_p \frac{dT_{\text{in_НР}}}{dt} = \dot{m}_{\text{НР}}c_p(T_{\text{in_НР}} - T_{\text{out_НР}}) + Q_{\text{НР}} - Q_{\text{втратНР}} \quad (2.7)$$

де:

$T_{\text{out_НР}}$ – температура теплоносія на вході в тепловий насос (з бака);

$T_{\text{in_НР}}$ – температура теплоносія на виході з теплового насоса;

$Q_{\text{НР}}$ – тепловий потік, який додає тепловий насос.

$$Q_{\text{НР}} = P_{\text{НР}} \cdot \text{COP} \quad (2.8)$$

$$P_{\text{НР}} = P_{\text{base}} \cdot \left(1 + \alpha \sin\left(\frac{2\pi t}{86400}\right)\right) \quad (2.9)$$

де:

$P_{\text{НР}}$ – електрична потужність теплового насоса;

P_{base} – базова електрична потужність теплового насоса;

α – коефіцієнт амплітуди коливань (безрозмірна величина).

$$COP = COP_{nom} \cdot \frac{T_{дж} + 273}{T_{out_HP} + 273} \quad (2.10)$$

де:

COP_{nom} – номінальний коефіцієнт продуктивності;

$T_{дж}$ – температура джерела тепла (повітря, ґрунт тощо).

$$Q_{втратHP} = U_{втратHP} \cdot A_{втратHP} \cdot (\Delta T_{HP} - T_{вн}) \quad (2.11)$$

3. Робота сонячного колектору визначається як:

$$pV_{SC} c_p \frac{dT_{in_sc}}{dt} = Q_{solar} - Q_{HX_SC} - Q_{loss_SC} \quad (2.12)$$

де:

$Q_{solar} = \eta_{SC} I_{solar} A_{SC}$ – тепловий потік від сонячних колекторів;

η_{SC} – коефіцієнт корисної дії (ККД) сонячного колектора;

I_{solar} – сонячна інсоляція (потужність сонячного випромінювання);

A_{SC} – площа сонячного колектора.

$Q_{HX_SC} = \dot{m}_{SC} c_p (T_{out_SC} - T_{in_SC})$ – тепловий потік, переданий через теплообмінник;

$Q_{втратSC} = U_{втратSC} \cdot A_{втратSC} \cdot (\Delta T_{SC} - T_{вн})$ – теплові втрати.

4. Робота джерела скидного тепла, підключеного через теплообмінник визначається як:

$$pV_{HX_скид} c_p \frac{dT_{HX_скид}}{dt} = \dot{m}_{скид} c_p (T_{source} - T_{HX_скид}) \cdot f_{скид} - Q_{втрат_скид} \quad (2.13)$$

де:

T_{source} – температура джерела скидного тепла;

$T_{HX_скид}$ – температура теплоносія на виході з теплообмінника скидного тепла;

$f_{скид} = 1$, якщо джерело скидного тепла активне і $f_{скид} = 0$, якщо ні;

$Q_{втрат_скид} = U_{втрат_скид} \cdot A_{втрат_скид} \cdot (\Delta T_{HX_скид} - T_{вн})$ – теплові втрати.

5. Рівняння зміни температури бака-акумулятора:

$$pV_{акум} c_p \frac{dT_{out_source}}{dt} = \dot{m}_{source} c_p (T_{out_source} - T_{акум}) - Q_{M1_акум}$$

$$-Q_{\text{рекуп}} - Q_{\text{втрат_акум}} \quad (2.14)$$

$Q_{\text{рекуп}}$ – тепловий потік, що передається в теплову мережу через теплообмінник 2 (0, якщо температура в баку нижче встановленого значення):

$$Q_{\text{рекуп}} = \dot{m}_{\text{рекуп}} c_p (T_{\text{out_акум}} - T_{\text{out_HX2}}) \quad (2.15)$$

$$Q_{\text{втрат_акум}} = U_{\text{втрат_акум}} \cdot A_{\text{втрат_акум}} \cdot (T_{\text{акум}} - T_{\text{вн}}) \quad (2.16)$$

6. Передача надлишкового тепла в теплову мережу через теплообмінник (14)

Якщо температура в баку $T_{\text{out_акум}} \geq 48^\circ\text{C}$, надлишкове тепло передається в теплову мережу (температура визначена для фізичного експерименту, що описаний в наступному розділі та є змінною):

$$pV_{\text{HX2}} c_p \frac{dT_{\text{out_HX2}}}{dt} = \dot{m}_{\text{рекуп}} c_p (T_{\text{акум}} - T_{\text{out_HX2}}) \cdot f_{\text{рекуп}} - Q_{\text{втрат_HX2}} \quad (2.17)$$

де:

$$f_{\text{рекуп}} = 1, \text{ якщо } T_{\text{out_акум}} \geq 48^\circ\text{C};$$

$$f_{\text{рекуп}} = 0, \text{ якщо } T_{\text{out_акум}} < 48^\circ\text{C};$$

$$Q_{\text{втрат_HX2}} = U_{\text{втрат_HX2}} \cdot A_{\text{втрат_HX2}} \cdot (T_{\text{серед_HX2}} - T_{\text{вн}}) - \text{теплові втрати.}$$

7. Повна система диференціальних рівнянь для 2Н-ІТП із тепловим насосом (тип джерела інтегрований у склад 2Н-ІТП для проведення експериментальних досліджень)

1. Теплообмінник (2) ЦТ

$$\frac{dT_{\text{ЦТпод_HX1}}}{dt} = \frac{\dot{m}_{\text{ЦТ}} c_p (T_{\text{ЦТпод_HX1}} - T_{\text{ЦТзв_HX1}}) - U_{\text{HX1}} \cdot A_{\text{HX1}} \cdot \Delta T_{\text{HX1}} - U_{\text{втрат_ЦТ_HX1}} \cdot A_{\text{втрат_ЦТ_HX1}} \cdot (\Delta T_{\text{ЦТ_HX1}} - T_{\text{вн}})}{pV_{\text{ЦТ_HX1}} c_p} \quad (2.18)$$

2. Система опалення

$$\frac{dT_{\text{in_ОП}}}{dt} = \frac{\dot{m}_{\text{ОП}} c_p (T_{\text{in_ОП}} - T_{\text{out_ОП}}) + U_{\text{HX1}} \cdot A_{\text{HX1}} \cdot \Delta T_{\text{HX1}} + \dot{m}_{\text{М1_акум}} c_p (T_{\text{М1_акум}} - T_{\text{out_ОП}}) \cdot f_{\text{М1}} - Q_{\text{ОП}} - U_{\text{втрат_ОП}} \cdot A_{\text{втрат_ОП}} \cdot (\Delta T_{\text{ОП}} - T_{\text{вн}})}{pV_{\text{ОП}} c_p} \quad (2.19)$$

3. Тепловий насос

$$\frac{dT_{\text{in_НР}}}{dt} = \frac{\dot{m}_{\text{НР}} c_p (T_{\text{in_НР}} - T_{\text{out_НР}}) + \dot{m}_{\text{НР}} c_p (T_{\text{in_НР}} - T_{\text{out_НР}}) \cdot \text{COP} - U_{\text{втрат_НР}} \cdot A_{\text{втрат_НР}} \cdot (\Delta T_{\text{НР}} - T_{\text{вн}})}{pV_{\text{НР}} c_p} \quad (2.20)$$

4. Бак-акумулятор

$$\frac{dT_{\text{акум}}}{dt} = \frac{\dot{m}_{HP} c_p (T_{inHP} - T_{\text{акум}}) - \dot{m}_{M1\text{акум}} c_p (T_{M1\text{акум}} - T_{outOP}) \cdot f_{M1} - \dot{m}_{\text{рекуп}} c_p (T_{\text{акум}} - T_{out_{HX2}}) \cdot f_{\text{рекуп}} - U_{\text{втрат_акум}} \cdot A_{\text{втрат_акум}} \cdot (T_{\text{акум}} - T_{\text{вн}})}{p V_{\text{акум}} c_p} \quad (2.21)$$

5. Рекуперація (передача надлишкового тепла в теплову мережу)

$$\frac{dT_{out_{HX2}}}{dt} = \frac{\dot{m}_{\text{рекуп}} c_p (T_{\text{акум}} - T_{out_{HX2}}) \cdot f_{\text{рекуп}} - U_{\text{втрат}_{HX2}} \cdot A_{\text{втрат}_{HX2}} \cdot (T_{\text{серед}_{HX2}} - T_{\text{вн}})}{p V_{HX2} c_p} \quad (2.22)$$

Після виведення диференціальних рівнянь, які описують теплові процеси в 2Н-ІТП, переходимо до їх чисельного розв'язання та моделювання в MATLAB. У даній моделі система складається з теплового насоса, бака-акумулятора, теплообмінників (HX1 (2) і HX2(14)) та системи опалення, що підключена до мережі ЦТ. Основна мета моделювання — дослідити динаміку температур у системі, зокрема температури теплоносія в системі опалення (T_{in_OP}), бака-акумулятора ($T_{\text{акум}}$), на виході з теплового насоса (T_{out_HP}), а також температури подачі ЦТ ($T_{\text{ЦТпод}_{HX1}}$) та режиму роботи HX2 (14) при передачі надлишків теплоносія в систему ЦТ ($f_{\text{рекуп}}$).

Тепловий насос є ключовим джерелом тепла в системі, забезпечуючи нагрів бака-акумулятора. Для моделювання враховано добові коливання зовнішньої температури ($T_{\text{зовн}}(t)$), теплового навантаження ($Q_{OP}(t)$) та потужності теплового насоса ($P_{HP}(t)$), які задаються синусоїдальними функціями:

Синусоїдальна температура зовнішнього повітря:

$$T_{\text{зовн}}(t) = T_{\text{зовн_базова}} + A \sin\left(\frac{2\pi t}{T_{\text{day}}}\right) \quad (2.23)$$

Синусоїдальна зміна теплового навантаження:

$$Q_{OP}(t) = Q_{OP\text{базова}} \cdot (1 + \alpha \sin(\frac{2\pi t}{T_{\text{day}}} + \varphi)) \quad (2.24)$$

Синусоїдальна зміна потужності теплового насоса:

$$P_{HP}(t) = P_{HP\text{базова}} \cdot (1 + \alpha \sin(\frac{2\pi t}{T_{\text{day}}})) \quad (2.25)$$

Задана температура в системі опалення ($T_{\text{розрах}}(t)$) регулюється залежно від ($T_{\text{зовн}}(t)$), щоб адаптувати теплове навантаження до зовнішніх умов:

Задана температура в системі опалення:

$$T_{\text{розрах}}(t) = T_{\text{розрах_базова}} + k(T_{\text{зовн_базова}} - T_{\text{зовн}}(t)) \quad (2.26)$$

Для оптимізації роботи системи реалізовано такі механізми:

- Пріоритет використання тепла з бака-акумулятора: Якщо температура бака ($T_{\text{акум}}$) перевищує ($T_{\text{розрах}}$) тепло з бака використовується для опалення, а ЦТ вимикається шляхом зменшення масової витрати теплоносія ($\dot{m}_{\text{ЦТ}}$) до нуля. Щоб реалізувати закриття регулювального клапана перед теплообмінником (2) ЦТ, коли тепло надходить із бака-акумулятора, потрібно регулювати ($\dot{m}_{\text{ЦТ}}$) залежно від (f_{M1}):

$$\dot{m}_{\text{ЦТ}} \begin{cases} 0, \text{ якщо } f_{M1} = 1 (T_{\text{акум}} \geq T_{\text{розрах}}) \\ \dot{m}_{\text{ЦТ_базова}}, \text{ якщо } f_{M1} = 0 (T_{\text{акум}} < T_{\text{розрах}}) \end{cases}$$

- Передача надлишкового тепла: Якщо $f_{\text{рекуп}} = 1 - T_{\text{out_акум}} \geq 48^\circ\text{C}$;
 $f_{\text{рекуп}} = 0 - T_{\text{out_акум}} < 48^\circ\text{C}$ надлишкове тепло передається в теплову мережу через теплообмінник НХ2 (14);

- Плавне регулювання: Для уникнення різких змін у режимах роботи використано сигмоїдні функції для регулювання потоків тепла ($f_{M1}, f_{\text{рекуп}}$):

$$f_{M1}, f_{\text{рекуп}} = \frac{1}{1 + e^{-k(T_{\text{акум}}(t) - T_{\text{поріг}, f_{M1}, f_{\text{рекуп}}})}}$$

де:

$$T_{\text{поріг}, f_{M1}} \geq T_{\text{розрах}}, k = 1;$$

$$T_{\text{поріг}, f_{\text{рекуп}}} \geq 48^\circ\text{C}, k = 1.$$

Моделювання виконано в MATLAB з використанням чисельного розв'язувача ode45 (метод Рунге-Кутта 4-5 порядку, який адаптивно обирає крок інтегрування для точного розв'язання систем звичайних диференціальних рівнянь) для системи диференціальних рівнянь. Це дозволяє проаналізувати енергоефективність 2Н-ІТП та визначити оптимальні режими роботи системи, включаючи тепловий насос, для забезпечення комфортних умов та економічної вигоди.

На Рис.2.2 зображено результати моделювання динаміки температур у системі 2Н-ІТП протягом одного доби (24 годин). Кожен графік відображає зміну температури в ключових компонентах системи та періоди передачі надлишкового тепла в систему ЦТ ($f_{\text{рекуп}}$): зовнішнього повітря ($T_{\text{зовн}}$), первинного контуру ($T_{\text{ЦТпод_НХ1}}$), фактичної в системі опалення ($T_{\text{in_оп}}$), розрахункової в системі опалення ($T_{\text{розрах}}$), теплоносія на виході з високотемпературного теплового насоса ($T_{\text{out_HP}}$) та бака-акумулятора ($T_{\text{акум}}$).

Опис графіків

1. Зовнішня температура ($T_{\text{зовн}}$):

Перший графік демонструє синусоїдальні коливання зовнішньої температури в межах від 6°C до $-3,5^{\circ}\text{C}$. Це відображає добові зміни температури. Такі коливання впливають на теплове навантаження системи опалення.

2. Температура теплоносія в первинному контурі від ЦТ ($T_{\text{ЦТпод_НХ1}}$):

Другий графік ілюструє температуру теплоносія в первинному контурі системи ЦТ, яка змінюється в межах $40\text{--}18^{\circ}\text{C}$. Періоди зниження температури до 18°C відповідають моментам, коли ЦТ вимикається ($m_{\text{ЦТ}} \approx 0$), оскільки енергія для опалення надходить із бака-акумулятора ($T_{\text{акум}} \geq T_{\text{розрах}}$). Підвищення температури до 40°C спостерігається, коли ЦТ активно працює, забезпечуючи тепло через теплообмінник НХ1 (2).

3. Розрахункова ($T_{\text{розрах}}$) та фактична ($T_{\text{факт}}$) температура в системі опалення:

Третій графік відображає фактичну температуру теплоносія в системі опалення ($T_{\text{факт}}$, суцільна червона лінія) та задану температуру ($T_{\text{розрах}}$, пунктирна чорна лінія). $T_{\text{факт}}$ коливається в межах $30\text{--}40^{\circ}\text{C}$, слідуючи за $T_{\text{розрах}}$ яка регулюється залежно від зовнішньої температури $T_{\text{розрах}}(t) = T_{\text{розрах_базова}} + k(T_{\text{зовн_базова}} - T_{\text{зовн}}(t))$.

4. Температура на виході з теплового насоса ($T_{\text{out_HP}}$):

Четвертий графік ілюструє температуру теплоносія на виході з теплового насоса, яка змінюється в діапазоні $49\text{--}80^{\circ}\text{C}$. Зростання температури корелює з

періодами активної роботи теплового насоса, коли його потужність ($P_{HP}(t)$) максимальна. Зниження температури спостерігається, коли тепловий насос працює на меншій потужності або коли тепло з бака-акумулятора використовується для опалення.

5. Температура бака-акумулятора ($T_{акум}$):

П'ятий графік показує температуру бака-акумулятора, яка коливається в межах 45–52,5°C. Температура зростає, коли тепловий насос нагріває бак, і знижується, коли тепло з бака використовується для опалення ($T_{акум} \geq T_{розрах}$) або передається в теплову мережу $T_{акум} \geq 48^\circ\text{C}$. Періоди стабільної температури свідчать про баланс між надходженням тепла від теплового насоса та його використанням. Невідповідність пікового завантаження бака-акумулятора та виробленого тепла тепловим насосом свідчить про нерівномірність передачі надлишків енергії до системи ЦТ, особливості споживання тепла в системі опалення, а також затримку передачі тепла від теплового насоса до бака-акумулятора через теплову інерцію останнього.

6. Режим роботи ЦТ та передачі надлишкового тепла:

Шостий графік відображає передачу надлишкового тепла (1 = активна, 0 = неактивна) де можна побачити, що періоди передачі надлишкового тепла в теплову мережу ($f_{рекуп} = 0$) є досить частими і мають як короткострокові, так і довгострокові інтервали. Короткострокові інтервали пов'язані з тим що температура бака-акумулятора швидко досягає порогового значення 48°C, але водночас швидко знижується через нерівномірність передачі тепла в систему опалення. Довгострокові інтервали пояснюються тим, що температура бака стабільно утримується вище 48°C, а температура на виході з теплового насоса перевищує 56°C. Частота і тривалість цих періодів вказують на те, що система часто досягає умов для передачі надлишкового тепла, особливо в другій половині доби, коли температура (T_{out_HP}) і $T_{акум}$ стабільно високі. Однак короткострокові сплески на початку свідчать про нестабільність у накопиченні тепла в баку через швидке використання тепла в системі опалення.

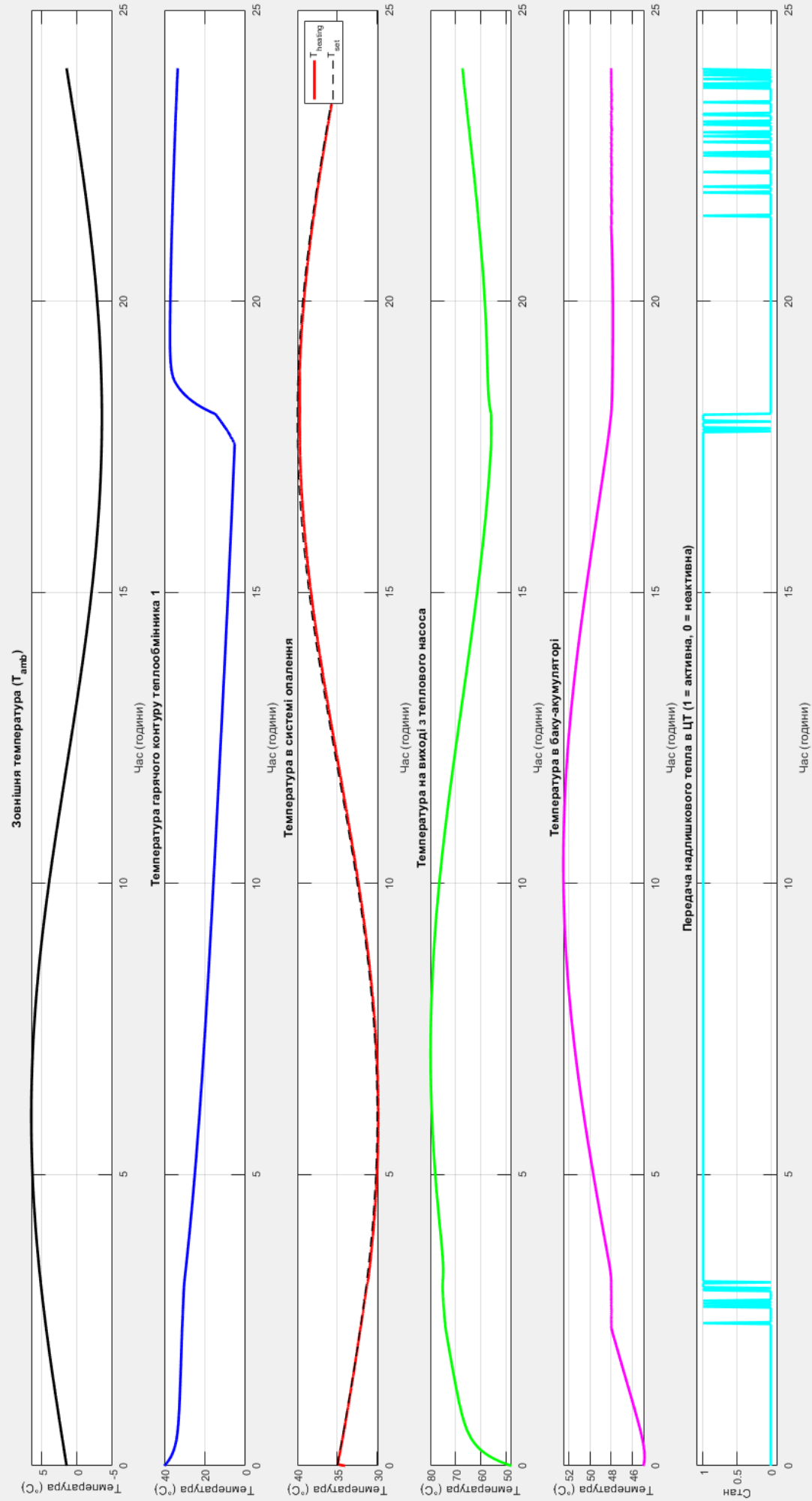


Рис.2.2 Результати моделювання роботи та динаміки температур у системі 2Н-ІТП

Результати моделювання показують, що система 2Н-ІТП ефективно підтримує температуру в системі опалення ($T_{\text{факт}}$) на заданому рівні ($T_{\text{розрах}}$), адаптуючись до змін зовнішньої температури ($T_{\text{зовн}}$). Закриття регулювального клапана в первинному контурі від системи ЦТ при ($T_{\text{акум}} \geq T_{\text{розрах}}$) дозволяє зменшити залежність від зовнішнього джерела тепла, а використання накопиченого тепла з бака-акумулятора підвищує енергоефективність системи.

Передача надлишкового тепла в теплову мережу відбувається досить часто, проявляючись у вигляді як короткострокових, так і довгострокових періодів. Короткострокові сплески на початку моделювання свідчать про швидке досягнення порогової температури $T_{\text{рекуп}} \geq 48^{\circ}\text{C}$, але подальше зниження температури бака через передачу тепла в систему опалення ($f_{M1} = 1$) та теплові втрати ($Q_{\text{втрат_акум}}$) знижують частку переданого тепла в мережу ЦТ. Довгострокові періоди передачі вказують на стабільне перевищення порогових значень ($T_{\text{рекуп}} \geq 48^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{out_HP}} \geq 56^{\circ}\text{C}$), що забезпечує більш тривалу передачу надлишкового тепла в мережу ЦТ.

Частота передачі надлишкового тепла свідчить про достатній рівень генерації теплової енергії тепловим насосом. Водночас нестабільність накопичення тепла в баку-акумуляторі в окремі періоди моделювання може вказувати на необхідність оптимізації параметрів системи, зокрема порогових значень температури та режимів роботи теплового насоса.

З метою оцінки економічної доцільності та підвищення ефективності передачі надлишкового тепла було проведено додаткові експериментальні дослідження, спрямовані на оптимізацію порогових температур та робочих режимів теплового насоса. Детальний опис та результати цих досліджень наведено в наступному розділі.

2.3. Висновки

У другому розділі дисертаційної роботи здійснено розробку принципової схеми 2Н-ІТП та побудовано фізико-математичну модель його функціонування

з урахуванням динаміки теплових потоків та тепломасообміну у ключових компонентах системи.

Запропонована схема 2Н-ІТП забезпечує три режими роботи: традиційне теплоспоживання з системи ЦТ, комбіноване постачання тепла із залученням локальних джерел (ВДЕ або скидного тепла), а також рекуперацію надлишкової теплової енергії до мережі ЦТ. Використання бака-акумулятора, інтелектуального керування насосами і клапанами, а також пріоритетності місцевого джерела дає змогу підвищити гнучкість та енергоефективність системи, а також сприяти зменшенню пікових навантажень у мережі.

Розглянуто й проаналізовано три типи локальних джерел тепла — тепловий насос, сонячні колектори та джерела скидного тепла. Проведений порівняльний аналіз конфігурацій ІТП та 2Н-ІТП засвідчив переваги останніх у контексті енергоефективності, надійності та потенціалу для інтеграції у сучасні тепломережі.

На основі сформованої схеми було побудовано систему диференціальних рівнянь, яка описує динаміку температур у різних компонентах 2Н-ІТП. Для чисельного розв’язання моделі використано адаптивний метод Рунге–Кутта (ode45), реалізований у MATLAB. Моделювання дозволило оцінити вплив зовнішньої температури, теплового навантаження, режимів роботи теплового насоса та накопичувача теплоти на загальну ефективність системи.

Результати моделювання підтверджують, що 2Н-ІТП здатен підтримувати стабільні температурні режими в системі опалення, зменшувати споживання тепла з мережі ЦТ, а також ефективно передавати надлишкову теплову енергію у зворотному напрямку. Водночас зафіксовано періоди нестабільності накопичення тепла в баку-акумуляторі, що вказує на потребу подальшої оптимізації порогових температур та режимів роботи джерел тепла.

Таким чином, розроблена схема та модель 2Н-ІТП демонструють високий потенціал для подальшого впровадження у системах теплозабезпечення, що орієнтовані на гнучке управління енергоресурсами та інтеграцію відновлюваних

джерел енергії. Отримані результати слугують науковим підґрунтям для наступного експериментального етапу дослідження.

РОЗДІЛ 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОТЕХНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДВОНАПРАВЛЕНОГО ТЕПЛОВОГО ПУНКТУ

3.1 Експериментальний стенд

З метою верифікації результатів фізико-математичного моделювання та оцінки реальних характеристик роботи 2Н-ІТП було розроблено та зібрано експериментальний стенд, що дозволяє досліджувати режими споживання, накопичення та повернення теплової енергії в систему ЦТ. Стенд реалізує концепцію інтеграції локальних джерел тепла — зокрема теплового насоса — до внутрішнього контуру споживача з можливістю динамічного управління потоками тепла залежно від поточних умов.

Експериментальна установка забезпечує імітацію повноцінного функціонування 2Н-ІТП, включаючи три ключові режими роботи: надходження теплової енергії з мережі ЦТ, комбіноване надходження теплової енергії від ЦТ та локального джерела, а також рекуперацію надлишкової теплової енергії, генерованої тепловим насосом, назад до тепломережі. Така архітектура дозволяє комплексно оцінити динаміку теплових процесів, ефективність функціонування основних компонентів системи, стабільність температурних режимів та можливості оптимізації керування.

В основу конструкції стенда покладено комерційний індивідуальний тепловий пункт Danfoss Akva Vita VX-2000, який було адаптовано під вимоги двонаправленого теплового обміну. Зокрема, теплообмінник, що традиційно використовується для гарячого водопостачання, був реконфігурований для реалізації зворотного теплового потоку в ЦТ. Крім того, до складу стенда входить бак-акумулятор, регулювальні клапани, циркуляційні насоси, датчики температури, теплові лічильники, елементи системи підживлення а також

електричний котел, який виконує функцію локального джерела тепла та дозволяє гнучко імітувати роботу теплового насоса, зокрема за рахунок можливості дистанційного керування, а також включення та вимкнення відповідно до заданого розкладу.

У цьому розділі наведено опис конструктивної структури експериментального стенда, функціонального призначення його основних компонентів, а також принципу роботи кожного елемента в контексті реалізації концепції 2Н-ІТП.

Для кращого розуміння роботи системи та взаємозв'язку її елементів розроблено узагальнену функціонально-гідравлічну схему Рис.3.1, яка відображає конфігурацію теплових контурів, логіку потоків теплоносія та точки підключення до системи ЦТ. Схема наочно демонструє реалізацію базових режимів роботи 2Н-ІТП, зокрема приймання тепла з мережі ЦТ, подачу його в систему опалення споживача, заряд акумулятора від локального джерела тепла (електричного котла, що імітує тепловий насос), а також повернення надлишкової теплової енергії в тепломережу.

Зображені на схемі компоненти обладнані засобами автоматичного регулювання, вимірювання температурних параметрів та споживання енергії, що забезпечує відтворення реальних умов експлуатації та дозволяє здійснювати детальний експериментальний аналіз. Далі наведено поелементний опис схеми з поясненням функціонального призначення кожного вузла та особливостей його роботи в межах експериментального стенда.

Важливою складовою експериментального стенда є електронний регулятор Danfoss ECL Comfort 310, який виконує функцію центрального елемента автоматизованого керування всіма тепловими процесами в системі 2Н-ІТП. Застосування цього регулятора забезпечує погодозалежне регулювання температури теплоносія, управління виконавчими механізмами (циркуляційними насосами та регулювальними клапанами), а також організацію передачі надлишкової теплової енергії до системи ЦТ.

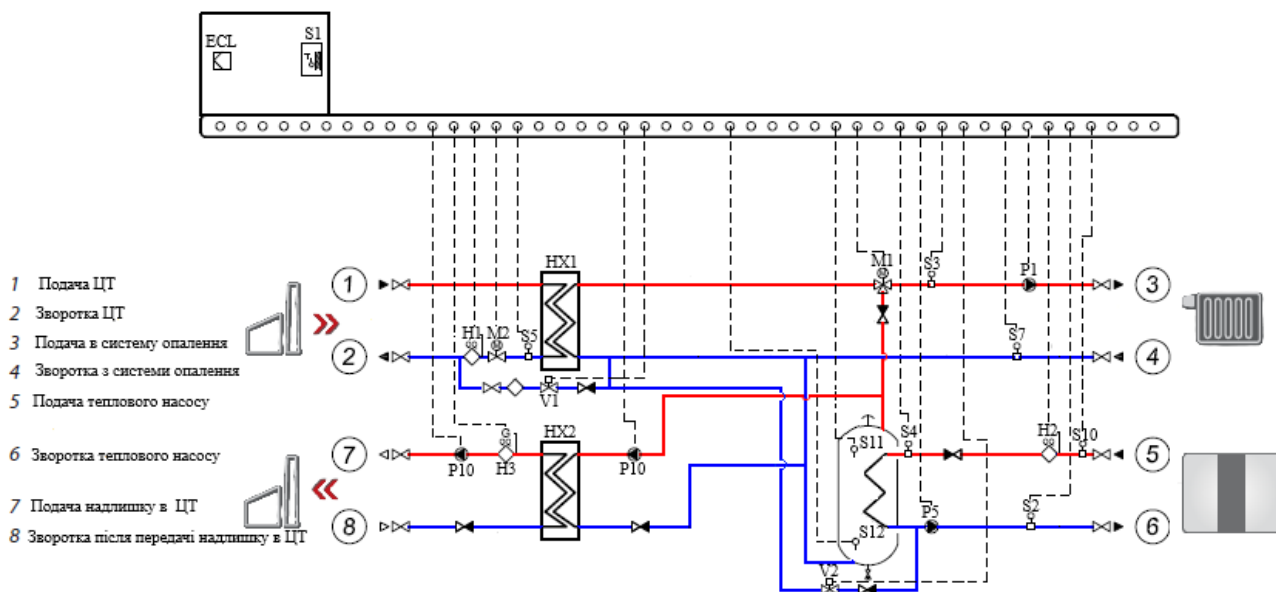


Рис.3.1 Функціонально-гідравлічна схема 2Н-ІТП з розміщенням основного обладнання

ECL Comfort 310 підтримує одночасне керування кількома контурами, що дозволяє реалізовувати складну функціональну логіку, в тому числі властиву системам з локальними джерелами та акумулюванням тепла. Завдяки підтримці з'єднання через Ethernet та протоколів Modbus TCP/IP і M-Bus для підключення лічильників енергії, регулятор може бути інтегрований у системи диспетчерського керування (SCADA) та хмарні платформи моніторингу, включно з Leanheat® Monitor, що розширює можливості аналізу та оптимізації теплових процесів. Для підключення датчиків температури використано термоперетворювачі опору типу Pt1000, які забезпечують високу точність вимірювань і стабільність у динамічних теплових процесах.

У складі експериментального стенда застосовано ключ P501 з застосуванням програми роботи P501.1. Завантажена програма підтримує погодозалежне регулювання температури подачі, обмеження температури зворотного теплоносія, керування режимами рекуперації та перемикання між джерелами тепла залежно від температурних умов і графіка навантажень.

Використання електронного регулятора ECL Comfort 310 з ключем P501 дозволило реалізувати енергоефективне, стабільне та гнучке керування тепловими потоками в експериментальній установці, що повністю відповідає функціональній концепції 2Н-ІТП. Це забезпечує достовірність отриманих

результатів, а також можливість масштабування системи для подальшого практичного впровадження в умовах реальної системи.

Для складання експериментального стенда була виготовлена металева рама за індивідуальними кресленнями автора, що забезпечує надійне кріплення всіх елементів системи, зручність у монтажі, демонтажі та обслуговуванні, а також відкритий доступ для візуального контролю та проведення вимірювань.



Рис.3.2 Експериментальний стенд 2Н-ІТП під час складання та (зліва) та при підключенні до системи тепlopостачання

У якості базового гідравлічного модуля першочергово було встановлено адаптований індивідуальний тепловий пункт Danfoss Akva Vita VX-2000, конструкція якого модифікована для реалізації двонаправленого теплообміну з системою ЦТ.

Крім того, до складу системи інтегровано електричний котел, який виконує роль імітованого локального джерела тепла, з можливістю керування за розкладом та дистанційно. Для забезпечення керування режимами роботи системи та збору даних встановлено елементи системи автоматичного

регулювання, включно з електронним контролером, температурними датчиками, виконавчими пристроями та засобами зв'язку з системою диспетчеризації.

Для імітації умов функціонування системи ЦТ в експерименті була використана система внутрішнього теплопостачання офісної будівлі Danfoss Україна, яка за своєю структурою повністю відповідає сучасній тепловій мережі з децентралізованим виробництвом теплової енергії (Рис.3.3). Джерелом теплопостачання в цій системі виступає комбінована тепла установка, що включає повітряний тепловий насос, тепловий насос типу вода/вода, а також електричні котли, які використовуються як пікове джерело тепла. Крім того, система оснащена тепловим акумулятором об'ємом 1000 літрів, що забезпечує стабілізацію температурного режиму та згладжування пікових навантажень.

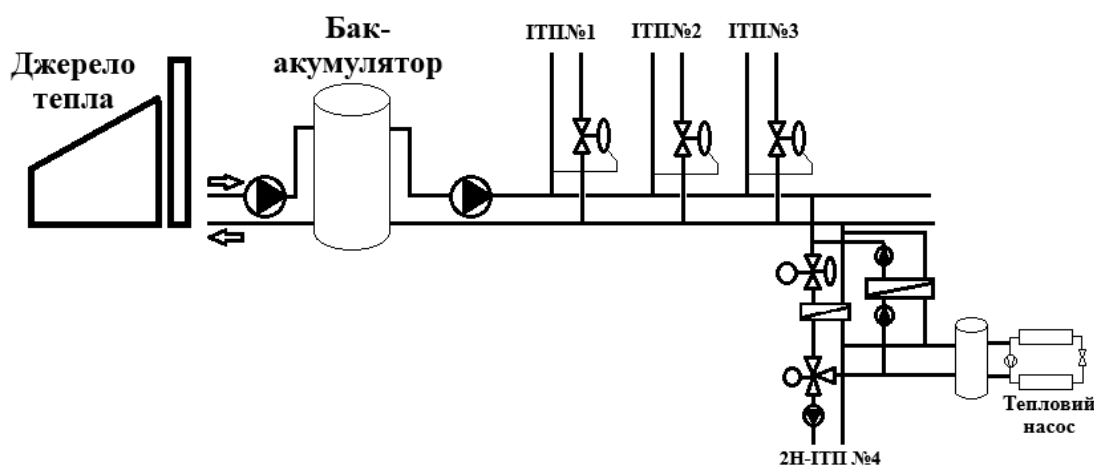


Рис.3.3 Структура системи внутрішнього теплопостачання офісної будівлі Danfoss Україна

Внутрішня мережа розподілу тепла сформована таким чином, що до неї підключено чотири гідравлічно збалансовані системи, які імітують споживачів теплової енергії. Три з них функціонують як типові ІТП, а четверта реалізує концепцію 2Н-ІТП (експериментальний стенд). Така конфігурація дозволяє не лише відтворити реальні умови роботи теплової мережі, але й дослідити вплив режимів 2Н-ІТП на загальний тепловий баланс системи, включаючи сценарії рекуперації надлишкового тепла в тепломережу.

У складі експериментального стенда в якості теплового акумулятора використано водонагрівач NIBE-BIAWAR Classic об'ємом 120 літрів, оснащений

вбудованим теплообмінником у вигляді спіральної труби з нержавіючої сталі довжиною 6 метрів і діаметром 15 мм. Цей бак забезпечує акумулювання теплової енергії, що надходить від локального джерела тепла (електричного котла, який імітує роботу теплового насоса), а також виконує функцію буферної ємності для передачі тепла в систему опалення або, за відповідних умов, для рекуперації надлишку тепла назад у мережу ЦТ.

При роботі за температурного графіка 65/55 °C (подача/зворотка), теплова потужність вбудованого теплообмінника становить орієнтовно 1,7 кВт, що відповідає витраті теплоносія приблизно 0,146 м³/год. Такі параметри забезпечують достатню інтенсивність теплопередачі для дослідження динаміки процесів заряджання та розряджання бака-акумулятора в умовах перемикання між режимами споживання, накопичення й рекуперації в межах реалізації концепції 2Н-ІТП.

У конструкції експериментального стенда застосовано два пластинчасті теплообмінники серії Danfoss XB06L, які забезпечують розділення контурів і передачу теплової енергії між елементами системи за різних режимів роботи 2Н-ІТП. Вибір теплообмінників обумовлений їх компактністю, високим коефіцієнтом тепловіддачі та можливістю ефективної роботи при малих витратах і температурних перепадах, що характерно для лабораторних систем і систем з використанням ВДЕ.

Теплообмінник Danfoss XB06L-1-20 використовується в експериментальному стенді для підключення системи опалення до системи ЦТ. Його конструкція забезпечує надійне теплове розділення первинного (мережевого) і вторинного (споживчого) контурів, мінімізуючи гідравлічний вплив тепломережі на внутрішню систему. Цей теплообмінник призначений для роботи в прямому напрямку потоку тепла та забезпечує стабільну подачу теплоти в систему опалення відповідно до заданих параметрів температури і витрати.

Другий теплообмінник — Danfoss XB06L-1-26 — виконує функцію передачі надлишкової теплової енергії з боку споживача назад у мережу ЦТ в

режимі рекуперації. Збільшена кількість пластин (порівняно з моделлю XB06L-1-20) дозволяє ефективніше працювати при зниженому температурному напорі та забезпечувати більшу теплову потужність у зворотному напрямку потоку. Така конфігурація теплообмінного обладнання дає змогу реалізувати двонаправлений режим передачі теплової енергії в межах одного індивідуального теплового пункту.

Обидва теплообмінники виготовлені з корозійностійкої нержавіючої сталі, що забезпечує довговічність і стабільність їхньої роботи. Конструкція теплообмінників типу *brazed plate* (запаяна пластинчаста конструкція) дозволяє досягти високої щільності потоку тепла при малих габаритах, що є критично важливим для компактного лабораторного стенда.

У контурі підключення системи опалення до системи ЦТ (позиція М2 на функціональній схемі Рис.38) застосовано комбінований регулювальний клапан AVQM з номінальним діаметром DN 15, максимальним робочим тиском PN 16 та пропускною здатністю $kv_s = 1,0 \text{ м}^3/\text{год}$ (діапазон витрати $0,02 - 0,4 \text{ м}^3/\text{год}$). Клапан оснащено електричним приводом AMV 10, 230 В з трипозиційним керуванням, що забезпечує точне регулювання витрати теплоносія відповідно до керуючого сигналу від електронного регулятора ECL Comfort 310.

AVQM складається із регулювального клапану із регульованим обмежувачем витрати, та призначеним для встановлення електроприводу, та регулювального елементу перепаду тиску з однією мембраною та імпульсною трубки. Завдяки цьому забезпечується точна та енергоефективна подача теплоносія до теплообмінника системи опалення (HX1), навіть за змінного теплового навантаження або нестабільних умов у магістралі ЦТ.

Привід AMV 10 здійснює позиціонування клапана відповідно до сигналу електронного регулятора та забезпечує плавне відкривання або закривання клапана залежно від температурного режиму. Клапан і привід утворюють вузол регулювання, що забезпечує обмеження витрати теплоносія та дозволяє реалізовувати заданий температурний режим відповідно до погодозалежного графіка в умовах експериментального дослідження.

Таким чином, застосування вузла AVQM з електроприводом AMV 10 дозволяє забезпечити гідравлічну стабільність, автоматичне обмеження витрати та точне регулювання в первинному контурі системи ЦТ, що є необхідним для аналізу ефективності роботи 2Н-ІТП в умовах змінного теплового навантаження.

В якості триходового регулювального клапана M1 на функціонально-гідравлічній схемі експериментального стенда використано клапан Danfoss VRB3, який виконує функцію керованого розподілу потоків теплоносія між подаючим трубопроводом системи опалення, що підключений до теплообмінника НХ1, та подаючим потоком від бака-акумулятора у випадку досягнення заданої температури в ємності. Така конфігурація дозволяє забезпечити динамічне перемикання джерела теплоти залежно від температурного режиму у системі, реалізуючи принцип пріоритетного використання локального джерела тепла.

Триходовий клапан VRB3 має пропускну здатність $kv_s = 1,0 \text{ м}^3/\text{год}$, що відповідає необхідному робочому діапазону витрати теплоносія у вторинному контурі системи. Для автоматизованого керування положенням клапана застосовано електричний привід AMV 25, який забезпечує трипозиційне регулювання на основі сигналу від контролера ECL Comfort 310. Завдяки цьому забезпечується точне позиціонування клапана, необхідне для реалізації логіки перемикання між джерелами теплоти та стабільного регулювання без порушення гідравлічного балансу системи.

Застосування регулювального вузла VRB3 + AMV 25 є ключовим для реалізації алгоритму змішування в умовах роботи 2Н-ІТП та дозволяє дослідити ефективність передачі тепла до системи опалення при змінному режимі роботи локального джерела.

У складі функціональної гідравлічної схеми експериментального стенда як циркуляційні насоси P1, P10 та P5 використано енергоефективні насоси Grundfos UPM3 AUTO 15-70 130. Ці пристрої є сучасними малогабаритними

циркуляційними насосами з електронним управлінням, призначеними для використання в системах опалення та охолодження.

Насоси серії UPM3 AUTO вирізняються вбудованою системою автоматичного керування робочими режимами, яка забезпечує адаптацію до змін гідравлічного опору в контурі та стабільну роботу при змінному навантаженні. У складі експериментального стенда ці насоси використовуються в наступних ділянках 2Н-ІТП:

- Насос P1 забезпечує циркуляцію в контурі системи опалення;
- Насоси P10 використовується для передачі надлишкової теплової енергії назад у систему ЦТ в режимі рекуперації;
- Насос P5 забезпечує циркуляцію теплоносія між локальним джерелом тепла (електричним котлом) і вбудованим теплообмінником бака-акумулятора, сприяючи зарядженню ємності при надходженні тепла від джерела.

Завдяки використанню насосів Grundfos UPM3 AUTO забезпечується надійна робота системи, енергетична ефективність та гнучке регулювання гідравлічного режиму відповідно до сценаріїв функціонування 2Н-ІТП.

Для вимірювання температури в ключових точках гідравлічної схеми експериментального стенда використано температурні датчики типу Pt1000 (ESM) виробництва Danfoss. Датчики є інтегрованою складовою системи автоматизації на базі електронного регулятора ECL Comfort 310 і не потребують додаткового калібрування протягом усього терміну експлуатації.

У точках, що позначені на функціонально-гідравлічній схемі (Рис.38) як S3, S5, S7, S2 та S10 встановлено накладні трубопровідні датчики ESMC, призначені для кріплення безпосередньо на поверхню труб. Вони мають температурний діапазон від 0 до +100 °C, стандартний клас захисту IP54, інтегрований кабель довжиною 2 метри та постійний час реакції приблизно 10 секунд, що є достатнім для точного контролю температур у системах

внутрішнього теплопостачання будівель, підключених до ЦТ або інших джерел теплопостачання.

Для контролю температури води в баку-акумуляторі в точках S11 і S12 застосовано занурювальні датчики ESMU-100 з довжиною термочутливого елемента 100 мм, які монтуються у гільзу з нержавіючої сталі. Ці датчики мають розширений робочий діапазон до $+140^{\circ}\text{C}$, ступінь захисту IP54 та дуже малу постійну часу (у воді) – лише 2 секунди, що дозволяє з високою швидкістю реагувати на зміну температури в акумулюючій ємності.

Усі датчики відповідають вимогам стандарту ДСТУ EN 60751 (Pt1000, клас точності B), мають номінальний опір 1000 Ом при температурі 0°C та повністю сумісні з регулятором ECL Comfort 310 без потреби в додатковому налаштуванні або калібруванні.

Для вимірювання кількості спожитої та переданої теплової енергії, витрати теплоносія, а також температур у подавальному та зворотному трубопроводах у складі експериментального стенда використано три ультразвукові теплолічильники типу SonoSafe 10 виробництва Danfoss. Дані лічильники забезпечують точні вимірювання при малих витратах, є компактними та повністю сумісними з системами автоматизації через інтерфейс M-Bus.

У точці підключення до системи ЦТ (позиція M11 на функціонально-гідравлічній схемі Рис.38) теплолічильник встановлено на зворотному трубопроводі, згідно з конструкцією базового модуля Akva Vita VX 2000. Використано прилад SonoSafe 10, DN15, який має номінальну витрату $0,6 \text{ м}^3/\text{год}$, і забезпечує вимірювання теплової енергії, що надходить до системи з боку ЦТ.

Для вимірювання кількості енергії, що надходить від локального джерела тепла (позиція M12 на функціонально-гідравлічній схемі Рис.38), використано ще один прилад SonoSafe 10, DN15, встановлений на подавальному трубопроводі після електричного котла. Його технічні характеристики ідентичні попередньому – номінальна витрата складає $0,6 \text{ м}^3/\text{год}$.

Третій теплолічильник встановлено в точці передачі надлишкової теплової енергії до системи ЦТ (позиція M13 на функціонально-гідравлічній схемі Рис.38). Тут також використовується аналогічний прилад SonoSafe 10, DN15 змонтований на подавальному трубопроводі, через який здійснюється рекуперація. Пристрій вимірює кількість енергії, повернутої в мережу ЦТ у двонаправленому режимі роботи 2Н-ІТП.

Усі три теплолічильники оснащено вбудованими модулями M-Bus і підключено до електронного регулятора ECL Comfort 310. Завдяки цьому забезпечується автоматичне зчитування показників витрати, температури та енергії, а також передача даних у хмарну платформу Leanheat Monitor, яка використовується для віддаленого моніторингу, аналізу та управління роботою 2Н-ІТП в режимі реального часу.

Експериментальний стенд передбачає наявність двох незалежних контурів підживлення — для системи опалення та для контуру локального джерела тепла. Така конструкція зумовлена гідравлічним розділенням контурів теплообмінниками, що унеможливорює перетік теплоносія між ними та потребує автономного регулювання тиску в кожному з них.

Керування процесом підживлення здійснюється незалежно для кожного контуру. На зворотному трубопроводі обох контурів встановлено мембранні реле тиску типу KPI 35 виробництва Danfoss, які реагують на падіння тиску нижче заданого рівня. У разі зниження тиску до порогового значення контакти реле замикаються, що активує відповідний електромагнітний клапан EV220B виробництва Danfoss, забезпечуючи автоматичну подачу теплоносія до системи.

У контурі системи опалення керування здійснюється через електромагнітний клапан V1, тоді як у контурі локального джерела тепла задіяний клапан V2 (див. функціонально-гідравлічну схему, Рис. 38). Для обох реле KPI 35 тиск спрацьовування встановлено на рівні 2 бар, з диференціалом 0,2 бар, що забезпечує стабільну роботу системи підживлення без надмірної частоти вмикання.

Кожен контур також обладнано власним розширювальним баком, який компенсує зміни об'єму теплоносія внаслідок температурних коливань та запобігає надлишковому тиску в системі.

Завдяки такій конфігурації забезпечується автономність і надійність підживлення обох гідравлічно розділених контурів, а також стабільність роботи експериментального стенда в широкому діапазоні робочих режимів.

В якості опалювального приладу використано панельний радіатор типу KALITE 300×400. Опалювальний прилад дозволяє моделювати теплове навантаження, характерне, в тому числі, для реальних низькотемпературних систем опалення. Застосування такого типу приладу забезпечує достовірне відтворення роботи кінцевого споживача та дозволяє досліджувати вплив зміни температури та витрати на теплову динаміку всієї системи.

При конструюванні експериментального стенда було використано трубопроводи з нержавіючої сталі номінальним діаметром DN15, що забезпечує надійність, корозійну стійкість та довговічність системи при роботі з теплоносієм у заданих температурних і тискових режимах. Усі основні функціональні блоки системи — теплообмінники, контур опалення, локальне джерело тепла, бак-акумулятор — обладнані запірною арматурою, що дає змогу здійснювати їхнє незалежне відключення під час обслуговування або реконфігурації експерименту.

Для запобігання зворотному потоку теплоносія у вузлових точках системи відповідно до функціонально-гідравлічної схеми встановлено зворотні клапани, які забезпечують односпрямований рух потоку та запобігають взаємному впливу контурів у процесах змішування або рекуперації.

Таким чином, конструкція експериментального стенда реалізує повнофункціональну модель 2Н-ІТП, здатну працювати в різних режимах — споживання теплової енергії з системи ЦТ, використання локального джерела тепла, накопичення та рекуперація надлишкової енергії. Використані технічні рішення, зокрема гідравлічне розділення контурів, незалежне підживлення, автоматизоване регулювання витрати та температури, а також система

дистанційного моніторингу, дозволяють відтворити типові експлуатаційні умови сучасних теплових пунктів і забезпечити достовірність експериментальних досліджень.

Особливістю даного стенда є застосування готового теплового пункту Danfoss Akva Vita VX 2000, конструкція якого була адаптована для двонаправленого режиму роботи. Це підтверджує можливість практичного впровадження концепції 2Н-ІТП у малих об'єктах, зокрема в невеликих житлових будівлях, приватних будинках, а також у складі малих теплових пунктів. Такий підхід відкриває перспективи для ширшого використання локальних джерел тепла та оптимізації взаємодії з системами ЦТ.

Конструктивна реалізація стенда забезпечує гнучкість, модульність та технічну обґрунтованість, що робить його придатним не лише для валідації математичних моделей, а й для випробувань нових алгоритмів керування, навчальних демонстрацій та апробації енергоефективних рішень у сфері теплопостачання.

3.2 Методика експериментальних досліджень

Мета і завдання експерименту

Метою експериментальних досліджень є оцінка теплотехнічної ефективності та функціональної стабільності роботи 2Н-ІТП в умовах змінного теплового навантаження та різних режимів взаємодії з системою ЦТ. Особливу увагу зосереджено на аналізі роботи системи в режимах: споживання тепла з мережі ЦТ, подачі тепла від локального джерела, накопичення теплової енергії в баку-акумуляторі, а також передачі надлишкової енергії назад у мережу (рекуперація).

Для досягнення поставленої мети визначено такі основні завдання експерименту:

- дослідити теплову поведінку системи в умовах роботи різних джерел теплопостачання (ЦТ/локальне джерело);

- визначити вплив температурного режиму та витрати теплоносія на ефективність заряджання і розряджання бака-акумулятора;
- проаналізувати роботу системи в режимі рекуперації: динаміку передачі тепла в зворотному напрямку, умови стабільності параметрів;
- оцінити динаміку перехідних процесів при автоматичному перемиканні режимів (з урахуванням роботи клапанів і насосів);
- зафіксувати значення основних контрольованих параметрів (температура, витрата, теплова потужність, енерговитрати) у ключових точках гідравлічної схеми;
- верифікувати працездатність алгоритмів керування, реалізованих на базі електронного регулятора ECL Comfort 310;
- підтвердити практичну ефективність і надійність експериментальної конфігурації 2Н-ІТП в умовах реального теплового навантаження.

Методологія дослідження

У ході експериментальних досліджень проводилась поетапна перевірка функціонування 2Н-ІТП в різних робочих режимах, а саме:

- 1) режим теплопостачання від ЦТ — забезпечення системи опалення тепловою енергією виключно з мережі ЦТ;
- 2) режим теплопостачання від локального джерела тепла — живлення системи через бак-акумулятор, який попередньо заряджається від електричного котла (імітація температурного режиму теплового насосу);
- 3) режим рекуперації тепла — передача надлишкової теплової енергії з боку споживача назад у мережу ЦТ;
- 4) комбіновані режими роботи — чергування або одночасна робота декількох джерел тепла з переходами між режимами в реальному часі.

Перед початком вимірювального періоду система приводилась у стандартні початкові умови, зокрема стабілізовану температуру в баку-акумуляторі та усталені значення температури в подавальному та зворотному трубопроводах. Перемикання між режимами роботи здійснювалося в

автоматичному режимі, відповідно до логіки керування, реалізованої в регуляторі ECL Comfort 310 із використанням програми P501.1.

Усі режими — теплопостачання від системи ЦТ, локального джерела, накопичення енергії та її рекуперація — активувалися автоматично залежно від встановлених параметрів температури в баку, потреби споживача в теплі, температури зовнішнього повітря, а також графіків навантаження. Це забезпечило безперервну, саморегульовану роботу системи, що відповідає принципу функціонування 2Н-ІТП.

Умови проведення експерименту

Експериментальні дослідження проводились в лабораторних умовах при стабільній температурі навколишнього середовища ($\approx 21\text{ }^{\circ}\text{C}$), що дозволяло мінімізувати вплив зовнішніх факторів на теплову динаміку системи. Опалювальне навантаження створювалося за допомогою панельного радіатора з примусовою циркуляцією теплоносія, що забезпечувало відтворення умов реального побутового споживача.

Параметри системи (тиск, температури, витрати) перед початком кожної серії вимірювань доводились до стабільного стану. Усі компоненти експериментального стенда працювали в автоматичному режимі відповідно до попередньо заданих алгоритмів, реалізованих у регуляторі ECL Comfort 310. Перемикання між джерелами тепла, активація режиму рекуперації та зміна положень клапанів і насосів здійснювались без зовнішнього втручання, виключно на основі виміряних параметрів системи.

Контрольовані параметри та вимірювальні засоби

У процесі експериментальних досліджень здійснювався постійний моніторинг ключових параметрів, що характеризують теплотехнічний стан системи та динаміку її роботи в різних режимах. Усі вимірювання виконувались автоматично, за допомогою вбудованої системи регулювання та збору даних на базі електронного регулятора ECL Comfort 310.

Температурний контроль здійснювався в основних вузлових точках гідравлічної схеми за допомогою датчиків Pt1000 типу ESMC і ESMU-100.

Зокрема, температури реєструвались у точках S2, S3, S4, S5, S7, S10 (трубопроводи), а також S11 і S12 (внутрішній об'єм бака-акумулятора). Ці дані були критично важливими для оцінки ефективності теплообміну, визначення фаз заряджання/розряджання та контролю роботи джерел тепла.

Для контролю витрати теплоносія та кількості теплової енергії, що подається або передається в систему, використовувались ультразвукові тепловічильники SonoSafe 10 у точках Н1, Н2, Н3. З їх допомогою реєструвались енергетичні потоки від системи ЦТ, локального джерела тепла та в напрямку рекуперації.

Контроль тиску в системі реалізовано через мембранні реле КРІ 35, встановлені на зворотних трубопроводах обох контурів — опалення та локального джерела. Ці елементи не лише контролювали рівень тиску, але й виконували функцію автоматичного керування електромагнітними клапанами підживлення (V1, V2) у разі падіння тиску нижче порогового значення.

Стан виконавчих механізмів, зокрема клапанів М1 і М2, а також циркуляційних насосів Р1, Р5 і Р10, контролювався через інтерфейс електронного регулятора. Завдяки цьому здійснювався оперативний аналіз перемикання режимів і реагування системи на зміну теплових умов.

Усі дані з лічильників теплоспоживання SonoSafe 10 зчитувались через інтерфейс M-Bus, підключений до електронного регулятора ECL Comfort 310, який виконував функцію шлюзу передачі даних. Регулятор був інтегрований у локальну мережу за допомогою інтерфейсу Ethernet з використанням протоколу Modbus TCP/IP. У такій конфігурації ECL Comfort 310 забезпечував не лише локальне управління системою, а й передавання всіх зібраних даних до веб-сервісу Leanheat Monitor, що дає змогу віддалено здійснювати моніторинг, аналіз і управління режимами роботи 2Н-ІТП у реальному часі.

Інтервал фіксації параметрів становив 15 хвилин, що забезпечувало високу часову роздільну здатність при аналізі динаміки температур, витрат та перемикань режимів у ході експерименту.

Повторюваність і відтворюваність

Уся система функціонувала в автоматичному режимі впродовж повного опалювального сезону 2024/2025 років, що дозволило забезпечити високу повторюваність експериментальних циклів без необхідності втручання оператора. Режими роботи 2Н-ІТП — зокрема теплопостачання від системи ЦТ, живлення від локального джерела, рекуперація надлишкової енергії, а також перехідні процеси між ними — реалізовувалися автоматично відповідно до налаштувань регулятора ECL Comfort 310.

Електричний котел, що моделює тепловий насос, активувався двічі на добу згідно з заданим розкладом, що забезпечувало регулярне заряджання бака-акумулятора. При досягненні температури, що перевищувала потреби системи опалення, активувався контур рекуперації надлишкового тепла в мережу ЦТ. Таким чином, усі функціональні режими системи неодноразово реалізовувалися в реальних експлуатаційних умовах.

Жодних збоїв або порушень у роботі системи протягом усього періоду експлуатації зафіксовано не було. Це дозволяє вважати, що кожен з досліджуваних теплових режимів був відтворений достатню кількість разів, що забезпечує статистичну достовірність і повторюваність результатів, отриманих у ході експерименту.

Верифікація результатів на основі даних з реальної системи

Для підвищення достовірності та об'єктивності отриманих у лабораторних умовах результатів, було здійснено верифікацію експериментальних даних шляхом порівняння з показниками функціонуючої реальної системи рекуперації тепла, встановленої на об'єкті роздрібної торгівлі.

У якості референсної системи виступає Heat Recovery Unit, реалізований у супермаркеті типу Danfoss Smart Store, розташованому в м. Нордборг (Данія). Система охолодження цього об'єкта функціонує на базі холодоагенту CO₂ (R744) та має можливість рекуперації надлишкової теплової енергії назад у мережу ЦТ. Дані з об'єкта були зібрані за допомогою веб-сервісу Leanheat Monitor, що

використовує ідентичний підхід до вимірювання, контролю та передачі даних, як і експериментальний стенд.

На основі аналізу показників температур, витрати, теплової потужності та динаміки рекупераційних циклів, зафіксованих на реальному об'єкті, підтверджено відповідність основних закономірностей та теплотехнічних характеристик, виявлених під час лабораторних випробувань. Зокрема, була зафіксована аналогічна поведінка системи у фазі передачі надлишків тепла, в тому числі за умов зміни навантаження, що свідчить про універсальність і прикладну цінність моделі 2Н-ІТП навіть для об'єктів з альтернативними джерелами теплової енергії.

Таким чином, верифікація результатів дослідження на базі діючої системи теплозабезпечення із використанням скидного тепла від системи охолодження, що працює на холодоагенті CO_2 дозволяє обґрунтовано стверджувати про високу надійність та прикладну достовірність експериментальної методики, застосованої для оцінки ефективності 2Н-ІТП.

Запропонована методика експериментального дослідження дозволяє комплексно оцінити функціональні та теплотехнічні характеристики 2Н-ІТП в умовах автоматизованого керування та змінного теплового навантаження.

Особливістю експерименту є його реалізація на повнофункціональному стенді, який протягом опалювального сезону 2024/2025 років працював у реальному режимі із циклічним повторенням сценаріїв: робота від системи ЦТ, заряд бака-акумулятора від локального джерела, передача надлишків тепла в мережу ЦТ (модель теплового просьюмера). Повна автоматизація системи забезпечила достовірність результатів, а передача даних до хмарного середовища Leanheat Monitor — їх безперервний моніторинг та зберігання.

Додаткова верифікація результатів на основі польових даних з комерційної CO_2 -системи рекуперації тепла у супермаркеті типу Danfoss Smart Store підтвердила застосовність та практичну ефективність розробленого підходу до організації двонаправленої теплової взаємодії.

Отримані експериментальні дані стали основою для подальшого аналізу, результати якого викладено в наступному розділі.

3.3 Аналіз результатів експериментальних досліджень

У цьому розділі наведено аналіз результатів експериментальних випробувань, проведених на основі функціонування експериментального стенда 2Н-ІТП. Дослідження охоплюють оцінку роботи системи в умовах реального теплового навантаження, з фіксацією основних теплотехнічних параметрів у режимах тепlopостачання від системи ЦТ, роботи від локального джерела тепла, рекуперації надлишкової енергії та перехідних станах.

Усі параметри було зафіксовано автоматично через систему керування на базі електронного регулятора ECL Comfort 310 із передачею даних у хмарний сервіс Leanheat Monitor. Це забезпечило високу роздільну здатність у часі, достовірність отриманих результатів та можливість детального аналізу динаміки системи в кожному з режимів.

Особлива увага приділяється динаміці зміни температур, витрат теплоносія, теплової потужності, а також часу реагування системи на зміну умов роботи. Окремо розглядаються закономірності поведінки системи під час переходу між джерелами тепла та ефективність роботи в режимі рекуперації.

Отримані результати дозволяють сформулювати якісну оцінку роботи 2Н-ІТП у широкому діапазоні режимів, а також обґрунтувати доцільність подальшого використання таких систем для підвищення гнучкості та енергоефективності тепlopостачання у малих і середніх об'єктах.

На графіку (Рис. 3.4) наведено динаміку зміни ключових параметрів системи 2Н-ІТП протягом періоду з 31 березня по 2 квітня 2025 року.

Протягом цього періоду система функціонувала в автоматичному режимі, відповідно до заданих алгоритмів керування, із циклічною активацією локального джерела тепла та подальшим споживанням теплової енергії з системи ЦТ.



Рис.3.4 Динаміка температур і потужності системи при автоматичному режимі роботи без рекуперації: аналіз впливу зарядки бака-акумулятора на зниження навантаження з боку системи ЦТ

На верхньому графіку видно, що температура в системі опалення (НС1) стабільно підтримується на рівні, близькому до розрахункового значення згідно з температурним графіком. Коливання температури подачі (36,8 °C) та її заданого значення (37,1 °C) не перевищують 0,3-0,5 °C, що свідчить про високу точність регулювання та ефективну роботу змішувального вузла. Температура зовнішнього повітря протягом усього періоду залишалась стабільною (близько -2,9 °C), що дозволяє виключити вплив кліматичних змін на поведінку системи у вибраному діапазоні.

На графіку також відображено цикли заряджання і розряджання буферної ємності (S11), температурний профіль якої демонструє характерний підйом до пікових значень (~49,7 °C), утримання на плато, а потім поступове зниження. Це вказує на періодичну зарядку бака-акумулятора локальним джерелом тепла відповідно до заданого розкладу.

Паралельно з цим, у нижній частині графіка простежується тенденція до зниження потужності споживання тепла з мережі ЦТ (M11) після кожного циклу зарядки бака. Потужність зменшується з 0,4 кВт до ~0,2 кВт, що свідчить про ефективне покриття частини навантаження за рахунок накопиченого тепла в

баку. Водночас загальна теплова енергія, спожита за цей період, становить 463,0 кВт·год, що дає змогу надалі оцінити питомі витрати залежно від частки роботи локального джерела.

На графіку (Рис. 3.5) наведено динаміку параметрів, що характеризують роботу локального джерела тепла, яке імітується електричним котлом, у тому ж часовому діапазоні, що й на попередньому графіку (Рис. 42). Метою даної візуалізації є виділення специфіки теплової поведінки підсистеми локального теплопостачання, яка в загальному графіку була менш помітною через масштабування.

У верхній частині графіка відображено температуру на виході з локального джерела (S10) та температуру у верхній частині бака-акумулятора (S11), що дозволяє простежити цикли заряджання буферної ємності. Видно, що після активації локального джерела температура на виході з локального джерела стрімко зростає до 80 °С, а потім — по мірі передачі тепла в бак — поступово знижується до 50–55 °С (встановлене значення 53 °С). Така поведінка повторюється кілька разів на добу, що відповідає встановленому розкладу включення електричного котла (включення локального джерела відбуваються за наступним графіком: перше включення в період з 05:00 до 08:00 та друге включення в період 16:00 до 23:00 кожного дня).

Температурна динаміка в баку-акумуляторі (S11) демонструє стабільний профіль із характерним підйомом після кожного циклу заряджання. Це свідчить про ефективне накопичення тепла і злагоджену роботу гідравлічного вузла між джерелом і баком. Температура подачі в систему опалення (S3) при цьому утримується на постійному рівні, що забезпечує безперервне живлення споживача тепловою енергією з буферної ємності навіть у моменти неактивності локального джерела.



Рис.3.5 Поведінка локального джерела тепла при заряджанні акумулятора: температура на виході, витрата та теплова потужність у контурі локального джерела.

У нижній частині графіка подано потужність локального джерела (M12), яка змінюється імпульсно — в межах 1,5–2,7 кВт залежно від циклу заряджання. Така пульсуюча форма навантаження зумовлена автоматичною модуляцією потужності електродкотла, яка активується при досягненні цільової температури в баку. Витрата води через теплообмінник локального джерела (M12) протягом усього періоду залишається переважно стабільною — на рівні близько 62 л/год, з незначними коливаннями, зумовленими автоматичним алгоритмом регулювання циркуляційного насоса Grundfos UPM3. Короткочасні переривання у витраті, що фіксуються на графіку, є наслідком внутрішніх діагностичних процедур системи (тест справності або захист від блокування насоса) і не пов'язані з фактичним завершенням теплового циклу.

Аналіз графіка на Рис. 42 дозволив встановити взаємозв'язок між температурними параметрами теплоносія, витратою в контурі локального джерела та ефективністю процесів заряджання і розряджання бака-акумулятора. Підтверджено, що стабільна витрата (~62 л/год) та підтримка заданого значення температури подачі з боку локального джерела забезпечують інтенсивне накопичення тепла у верхній зоні бака. Це, у свою чергу, дозволяє підтримувати розрахункову температуру подачі в систему опалення з мінімальним залученням додаткової енергії від системи ЦТ. Динаміка температурних і потужнісних

характеристик підтверджує високу термодинамічну ефективність фаз заряджання та стабільність розряджання в умовах комбінованого теплопостачання.

Аналіз даних, наведених на графіку Рис.3.6, свідчить про те, що при збільшенні тривалості роботи локального джерела тепла та підвищенні його теплової потужності, енергетичні потреби системи опалення можуть бути повністю забезпечені без залучення тепла з системи ЦТ. Зокрема, у період з 10:30 до 15:00 2 квітня 2025 року система працювала виключно за рахунок тепла, накопиченого в баку-акумуляторі. Це підтверджується нульовими показниками потужності з боку лічильників ЦТ (M11) та локального джерела (M12), при стабільному значенні температури подачі в систему опалення (близько 35 °C).

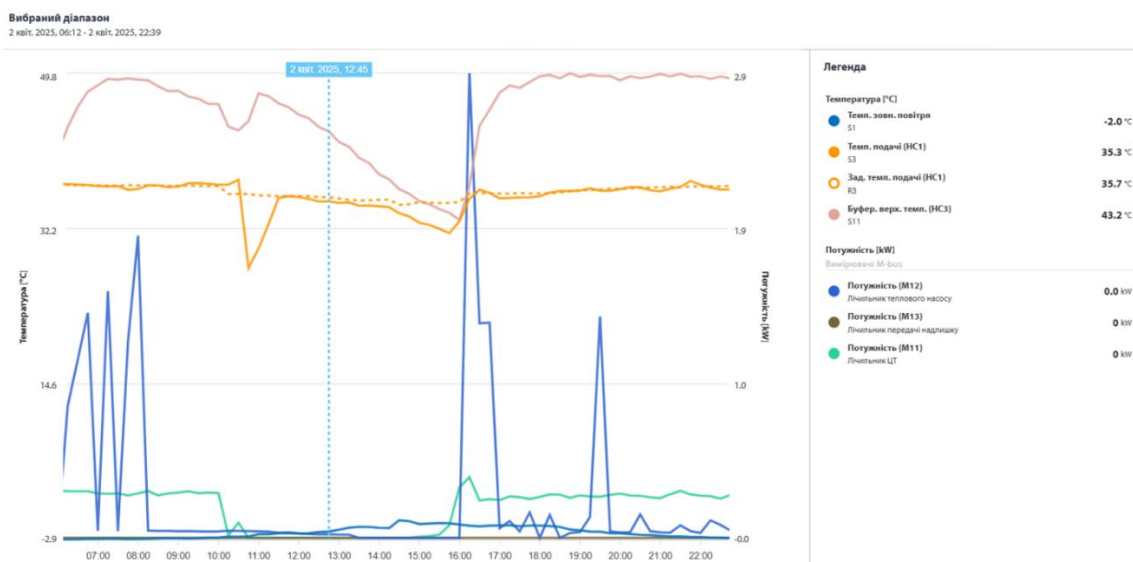


Рис.3.6 Використання тепла з баку-акумулятора для покриття потреб системи без залучення системи ЦТ: фаза повної автономності з підтриманням розрахункової температури подачі.

Поведінка температури в буферній ємності (S11) у цей період демонструє поступове зниження внаслідок розряджання, що вказує на ефективне використання накопиченої енергії для покриття навантаження. Отримані результати підтверджують доцільність використання акумулятора тепла як буферного елементу, що дозволяє зменшити навантаження на ЦТ, а також створює умови для реалізації стратегій оптимізації енергоспоживання, що особливо важливо для ВДЕ.

Таким чином, аналіз графіків (Рис. 3.4–3.6) підтверджує, що перемикання між джерелами теплопостачання — централізованим та локальним — відбувається коректно, із чітким дотриманням заданих температурних параметрів у системі опалення та зменшенням теплового навантаження на мережу ЦТ після зарядки бака-акумулятора. При цьому теплова поведінка системи залишається стабільною, передбачуваною і контрольованою в автоматичному режимі.

У даному періоді експлуатації режим рекуперації надлишкової енергії в мережу ЦТ був відключений, що дозволило зосередити увагу на аналізі комбінованої роботи двох джерел тепла — ЦТ та локального джерела. Такий підхід забезпечує об’єктивну оцінку енергодинаміки системи у режимах часткового навантаження, характерних для міжсезоння або перехідних погодних умов.

На графіку Рис. 3.7 проілюстровано роботу системи 2Н-ІТП у режимі рекуперації тепла, тобто передачі надлишкової теплової енергії від локального джерела назад у мережу ЦТ. Аналіз охоплює період з 4 по 6 квітня 2025 року, протягом якого система працювала в умовах низької температури зовнішнього повітря (до $-6,3^{\circ}\text{C}$), що обумовлювало підвищене теплове навантаження на опалення.

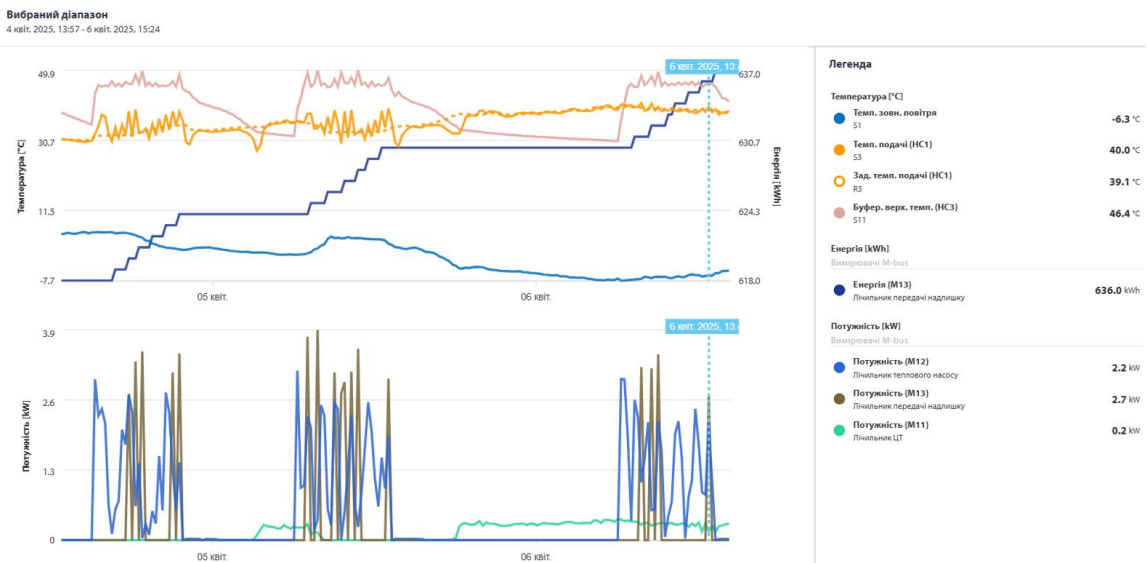


Рис.3.7 Робота системи 2Н-ІТП у режимі рекуперації надлишкової теплової енергії в мережу ЦТ: динаміка потужності, температур і накопиченої енергії в умовах знижених температур зовнішнього повітря.

На нижньому графіку видно, що теплова потужність локального джерела (M12) у пікові моменти досягала 2,2–2,6 кВт, що забезпечувало повне покриття навантаження системи опалення. Температура подачі (S3) залишалась стабільною в межах 39–40 °C, що відповідає розрахунковим параметрам. У той же час, теплова потужність, передана в мережу ЦТ (M13), свідчить про наявність надлишку тепла, який не споживався безпосередньо системою опалення і був спрямований у зворотному напрямку. Пікові значення потужності рекуперації перевищували 2,7 кВт.

Активація режиму рекуперації здійснювалась автоматично при досягненні температури у верхній зоні бака-акумулятора (S11) 47 °C, що є налаштованим пороговим значенням. У цей момент запускаються насоси P10 (згідно з функціонально-гідравлічною схемою на Рис.3.1), і надлишкове тепло починає відводитися в зворотну лінію ЦТ. Динаміка температури бака свідчить про те, що в режимі рекуперації його розрядження відбувається інтенсивніше, ніж у сценаріях з відключеним зворотним потоком, що підтверджує ефективність режиму з енергетичної точки зору.

Протягом фази активної рекуперації (5 квітня) система ЦТ (M11) не залучалась або працювала на мінімальному рівні (0,2 кВт), що вказує на фактичну енергетичну автономність системи у цей період. Кількість теплової енергії, переданої в мережу, становила 636,0 кВт·год, що є підтвердженням реального потенціалу 2Н-ІТП для виконання функції джерела тепла в зворотному напрямку. На початку зафіксованого на графіку періоду загальна кількість теплової енергії, переданої в мережу ЦТ, становила 618,0 кВт·год, тоді як на завершення періоду цей показник зріс до 636,0 кВт·год, що свідчить про фактичну реалізацію режиму рекуперації та підтверджує здатність системи 2Н-ІТП функціонувати як активне джерело тепла в мережі ЦТ.

Таким чином, режим рекуперації забезпечує не лише ефективну передачу надлишкової енергії, але й стабільність температурних параметрів, адаптацію до змін навантаження та зменшення споживання з ЦТ, що підтверджує практичну цінність двонаправленого підходу до теплозабезпечення.

Аналіз динаміки температурних параметрів та параметрів потужності у досліджених режимах (Рис. 41–44) дозволив здійснити оцінку перехідних процесів, які виникають під час автоматичного перемикання між джерелами теплопостачання та активації режиму рекуперації. Усі перемикання виконувались контролером ECL Comfort 310 відповідно до налаштувань програми P501.1 без втручання оператора, що дозволяє вважати систему повністю автоматизованою.

Включення локального джерела тепла (електричного котла, що імітує тепловий насос) супроводжується підвищенням температури теплоносія, яке фіксується датчиком S10 на виході з джерела, а також зростанням температури у верхній зоні бака-акумулятора (датчик S11), що свідчить про початок процесу його заряджання. Одночасно тепловий лічильник M12 реєструє генерацію теплової енергії, а триходовий клапан M1 автоматично переходить у положення, за якого тепло від локального джерела подається до системи опалення.

При досягненні заданої температури в баку-акумуляторі подача тепла в систему активується, що на графіках проявляється як утримання заданого рівня температури в точці подачі (S3) навіть при відключенні системи ЦТ. Перехідні процеси відбуваються плавно, без значних температурних коливань або гідравлічних збурень, що свідчить про коректну реалізацію алгоритмів керування та узгоджену роботу всіх виконавчих елементів системи.

У разі роботи від системи ЦТ, триходовий клапан M1 виконує функцію регулювання частки тепла, що надходить від локального джерела, забезпечуючи спільну роботу двох джерел. За умови, коли температура в баку-акумуляторі знижується і не дозволяє забезпечити розрахункову температуру подачі, клапан M1 автоматично перекриває контур локального джерела, і теплоносій подається виключно з боку ЦТ.

Особливо характерною є динаміка активації режиму рекуперації: при досягненні температури 47 °C у верхній зоні бака (S11), вмикаються насоси P10 та надлишок енергії надходить в систему ЦТ. У цей момент фіксується різке

зростання потужності на лічильнику передачі надлишків (M13) до 2,5–2,7 кВт, що свідчить про швидкий відгук системи на зміну температурного параметра. Перехідні процеси відбуваються без збоїв або порушення температурної стабільності в опалювальному контурі.

У межах експериментального дослідження було проаналізовано 24-годинний цикл роботи 2Н-ІТП за умов сталого опалювального навантаження. За добу система опалення спожила 13 кВт·год теплової енергії, при цьому локальне джерело (електричний котел, що імітує тепловий насос) згенерувало 12 кВт·год, мережа система ЦТ додатково надала 10 кВт·год, а 9 кВт·год було повернуто в ЦТ у вигляді надлишкової енергії.

Відповідно до енергетичного балансу:

76,9 % внесок ЦТ у комбінованому режимі роботи 2Н-ІТП;

90 % було енергії було повернуто у вигляді надлишкового тепла;

23,1% внесок локального джерела у комбінованому режимі роботи 2Н-ІТП;

Температура зовнішнього повітря у цей період становила $-11,3^{\circ}\text{C}$ на початку доби та поступово зростала до $-6,7^{\circ}\text{C}$ у другій половині дня.

Усі проаналізовані графіки демонструють високу узгодженість дій виконавчих механізмів (клапанів і насосів) та ефективну реалізацію алгоритмів перемикання в умовах змінного теплового навантаження, що свідчить про надійність і адаптивність запрограмованих режимів роботи 2Н-ІТП.

Аналіз тепловізійних зображень (Рис. 3.8) дозволяє підтвердити температурну різницю між середовищем, що передає надлишкове тепло з боку 2Н-ІТП, та середовищем у колекторі теплової мережі, до якого підключені інші споживачі тепла. Температура теплоносія в загальному колекторі, до якого приєднані три споживача та експериментальний стенд 2Н-ІТП, становить приблизно $33,9^{\circ}\text{C}$. При цьому температура в точці передачі надлишків тепла з боку 2Н-ІТП сягає близько $41,3^{\circ}\text{C}$, що перевищує температуру в колекторі майже на $7\text{--}10^{\circ}\text{C}$.

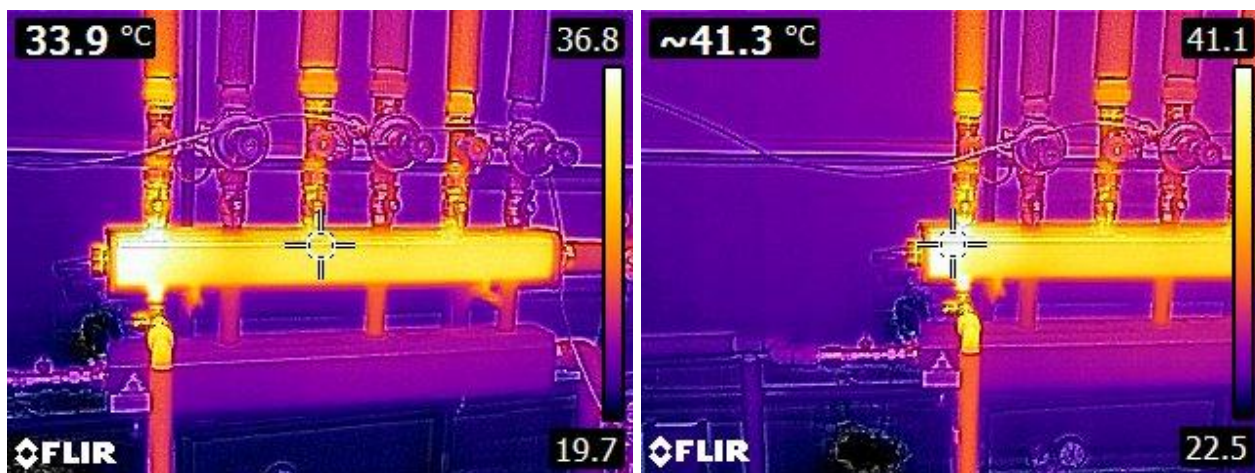


Рис. 3.8 Тепловізійний аналіз температури в колекторі теплової мережі: зліва — загальний колектор із трьома споживачами, температура становить $\sim 33,9^{\circ}\text{C}$; справа — ділянка введення надлишкового тепла від 2Н-ІТП, температура становить $\sim 41,3^{\circ}\text{C}$.

Це підтверджує можливість реалізації режиму рекуперації, оскільки тепла енергія передається у напрямку від більш нагрітого середовища до менш нагрітого. Водночас, зниження температури у місці передачі пояснюється тепловими втратами при проходженні теплоносія через теплообмінник НХ2 (Рис. 3.1), а також змішуванням з теплоносієм, що вже циркулює в колекторі, температура якого є значно нижчою. Таким чином, отримані тепловізійні знімки доповнюють результати експериментальних вимірювань та підтверджують ефективність функціонування 2Н-ІТП у режимі повернення надлишкового тепла.

Аналіз динаміки температур і потужностей на підставі експериментальних даних підтверджує коректну реалізацію алгоритмів перемикання режимів енергозабезпечення, закладених у програмний ключ Р501 регулятора ECL Comfort 310. Зокрема, зафіксовано відповідність дій регулятора очікуваній логіці керування насосами, клапанами та джерелами тепла. В момент зростання температури на виході з локального джерела активується процес заряджання бака-акумулятора, після чого система переходить до режиму покриття теплового навантаження за рахунок накопиченої енергії. У разі перевищення температури у верхній частині бака встановленого порогу, вмикається контур рекуперації, і надлишкова тепла енергія повертається в систему ЦТ, що супроводжується фіксацією потужності лічильником М13. Перехідні процеси відбуваються

стабільно, без різких коливань, що вказує на узгодженість роботи виконавчих механізмів з логікою керування.

Таким чином було підтверджено, що реалізована конфігурація 2Н-ІТП демонструє стабільну роботу, надійність керування та ефективне використання теплової енергії в умовах реального змінного теплового навантаження. Завдяки автоматичній реалізації основних сценаріїв — теплопостачання від системи ЦТ, локального джерела, а також режиму рекуперації — система забезпечує гнучке реагування на зміну потреб споживача та температурних умов без участі оператора.

Аналіз переходів між режимами, динаміки потужностей, витрат та температур підтверджує, що така система здатна зменшувати пікове навантаження на мережу ЦТ, підвищувати рівень самозабезпечення теплом завдяки локальному джерелу та повертати надлишкову енергію, коли це енергетично доцільно. Це робить 2Н-ІТП придатним до впровадження не лише в багатоквартирних житлових будівлях, а й у малих приватних домогосподарствах, адміністративних і громадських будівлях, з перспективою інтеграції в сучасні концепції розумного теплопостачання та децентралізованих енергетичних систем.

Для підтвердження універсальності розробленого підходу та результатів, отриманих у лабораторних умовах, у подальшому розділі розглядається реальний приклад впровадження індивідуального теплового пункту з можливістю передачі надлишків тепла в мережу ЦТ від системи охолодження CO₂ в одному з супермаркетів Danfoss Smart Store (Данія, Lundenvvej 4, 6430 Nordborg), який функціонує за схожими принципами двонаправленої теплової взаємодії з мережею централізованого теплопостачання.

3.4 Верифікація результатів експерименту на прикладі супермаркету Smart Store (принцип 2Н-ІТП)

У попередніх розділах було детально розглянуто результати експериментальних досліджень 2Н-ІТП, що продемонстрували його

ефективність у керуванні потоками теплової енергії між різними джерелами та споживачами. Для підтвердження отриманих результатів та оцінки можливості практичного застосування подібних систем доцільно звернутися до реальних прикладів впровадження аналогічних технологій.

Одним із таких прикладів є використання Heat Recovery Unit (HRU), призначеного для рекуперації надлишкового тепла від холодильних установок, що працюють на CO₂ (Рис.3.9). Отримане тепло може бути повторно використане для опалення приміщень, підігріву гарячої води або навіть передане до мережі ЦТ. Така реалізація дозволяє не лише істотно зменшити витрати на опалення супермаркету, але й, у певні періоди, отримувати фінансові надходження від продажу надлишкової теплової енергії.



Рис.3.9 Модуль рекуперації тепла (Heat Recovery Unit) на базі Danfoss Smart Store підключений до системи охолодження CO₂.

HRU є інтегрованим рішенням, до складу якого входить електронний регулятор ECL Comfort 310 із ключем P501 (програма роботи P501.13) — схоже за алгоритмами керування програмно-апаратне забезпечення використовувалося в експериментальній установці 2Н-ІТП. Система підтримує дистанційне керування та моніторинг через веб-сервіс Leanheat Monitor, що дозволяє не лише ефективно керувати процесами рекуперації тепла, а й забезпечує доступ до архівів даних, аналітики та режимів роботи системи в реальному часі. Єдність

використаного обладнання для автоматизації та моніторингу забезпечує можливість безпосереднього порівняння результатів, отриманих у лабораторному експерименті, з роботою реальної польової системи в умовах супермаркету.

Таким чином, аналіз роботи HRU в реальних умовах експлуатації супермаркетів дозволяє верифікувати результати, отримані під час експериментальних досліджень 2Н-ІТП, та підтвердити ефективність і надійність запропонованих підходів до керування тепловими потоками в системах теплопостачання.

На схемі (Рис.3.10) відображено функціонування HRU, підключеного до холодильного контуру супермаркету на CO₂ та системи ЦТ. У поточному режимі система працює виключно за рахунок теплоти, що відбирається з холодильного обладнання.

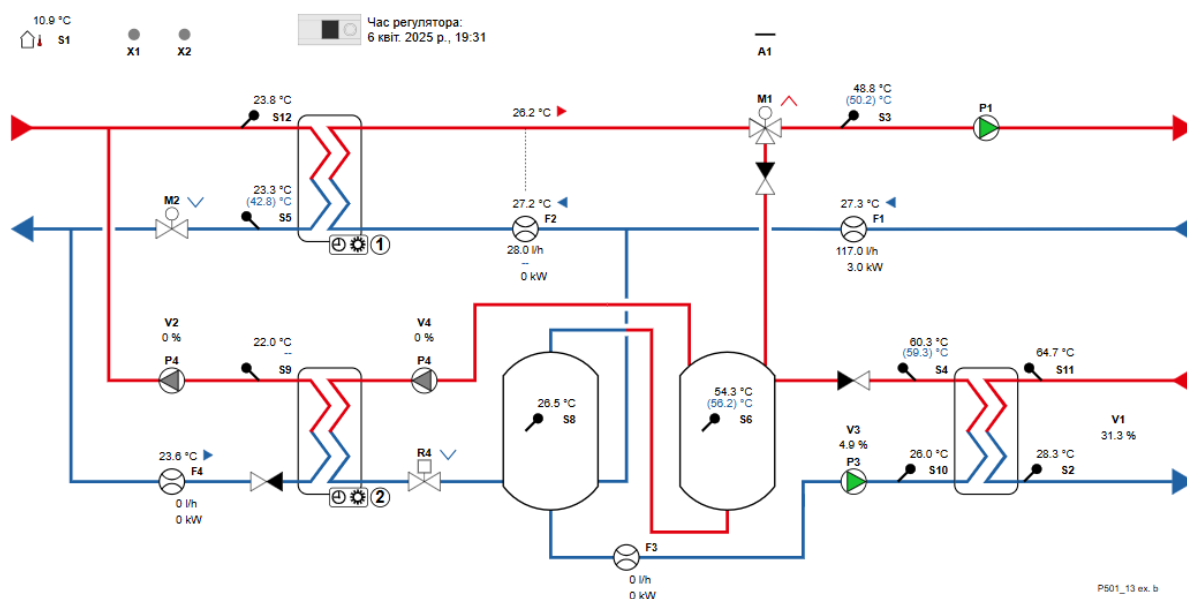


Рис.3.10 Схема роботи модуля рекуперації тепла HRU у режимі реального часу

Графік на Рис. 3.11 ілюструє річну динаміку роботи HRU. Дані охоплюють період із 1 січня 2024 року по 6 квітня 2025 року та охоплюють чотири ключові канали обліку теплових потоків:

- M11 (F1): подача тепла в систему опалення об'єкта;
- M12 (F2): подача тепла з системи ЦТ;

- M13 (F3): надходження теплової енергії від холодильного обладнання (CO₂-система);

- M14 (F4): передача надлишкового тепла назад у ЦТ.

Зимово-осінній період (листопад — березень). У цей період домінує потік M11 (зелена лінія) — надходження теплової енергії до системи опалення, що логічно відповідає сезонному зростанню теплового навантаження. Помітна активна робота CO₂-системи (M13 — коричнева лінія), яка частково або повністю покриває потреби в опаленні, знижуючи споживання з централізованої мережі (M12 — синя лінія), що особливо помітно в періодах помірних температур.



Рис.3.11 Графік динаміки теплових потоків у системі HRU супермаркету COOP365 Nordborg за період з 1 січня 2024 року по 6 квітня 2025 року

При зниженні зовнішньої температури система теплопостачання HRU функціонує у комбінованому режимі, використовуючи два джерела теплової енергії — систему ЦТ та надлишкове тепло, що генерується холодильними установками на CO₂ супермаркету. Алгоритм керування забезпечує пріоритет використання тепла від CO₂, орієнтуючись на значення температури в баках-акумуляторах (датчики S6 та S8) та поточну температуру теплоносія в системі опалення (S3). У випадках, коли температура в першого по ходу від системи CO₂ баку (S8) досягає розрахункової відповідно до температурного графіка, тепла

енергія надходить виключно від системи CO₂. За умови подальшого підвищення температури в другому баку (S6) понад встановлене значення для рекуперації, активується передача надлишку тепла в зворотному напрямку до системи ЦТ. Якщо потужності від системи CO₂ недостатньо для покриття теплового навантаження, додаткова частка тепла забезпечується від ЦТ. Така логіка керування гарантує максимально ефективне використання відновлюваних джерел тепла та забезпечує адаптацію до змін теплового навантаження без необхідності ручного втручання.

Весняно-літній період (квітень — вересень). Під час зменшення або повної відсутності потреби в опаленні ($M11 \approx 0$) система автоматично переключається в режим рекуперації надлишкової енергії в мережу ЦТ. Це відображено зростанням значення M14 (світло-фіолетова лінія) — тепловий потік у напрямку централізованої мережі. Активність цього режиму посилюється в літні місяці, коли холодильна система (CO₂) працює найінтенсивніше, виробляючи значні обсяги тепла, яке може бути реалізоване за межами об'єкта.

Таким чином, HRU виконує функцію локального джерела тепла з акумулюванням енергії, споживача і постачальника — що і є суттю 2Н-ІТП. У результаті:

- Знижуються пікові навантаження на систему ЦТ;
- Забезпечується повноцінна утилізація відпрацьованого тепла з холодильного обладнання;
- Влітку забезпечується фінансово доцільна передача тепла в ЦТ, з потенціалом для доходу;
- Система автоматично адаптується до зовнішніх умов та навантаження завдяки інтегрованій логіці електронного регулятора.

На основі графіків, наведених на Рис. 49 (HRU) та Рис. 50 (експериментальний стенд), можна здійснити порівняльний аналіз температурного контролю та динаміки теплопостачання в реальних та лабораторних умовах функціонування 2Н-ІТП:

На Рис. 3.12 зображено роботу HRU в складі супермаркету Smart Store. Система демонструє значну амплітуду коливань потужності теплопостачання (M11) протягом доби, що пов'язано з режимом роботи холодильного обладнання на CO₂. При цьому фактична температура подачі (S3) місцями відхиляється від розрахункової температури (R3), особливо у ранкові та післяобідні години. Це свідчить про природні коливання рекуперативного джерела тепла, які, однак, частково компенсуються системою акумуляції.

Для покращення динамічної стабільності температурного режиму та зменшення затримки реакції системи на зміни теплового навантаження доцільним є збільшення швидкості роботи виконавчого механізму, що регулює положення триходового клапана M1. Наразі швидкість переміщення штока становить 7,5 с/мм, що є недостатньо чутливим до швидких змін температури з боку джерела CO₂. Оптимізація цього параметра дозволить оперативніше реагувати на флуктуації температурного графіка та підвищити якість автоматичного регулювання теплопостачання.

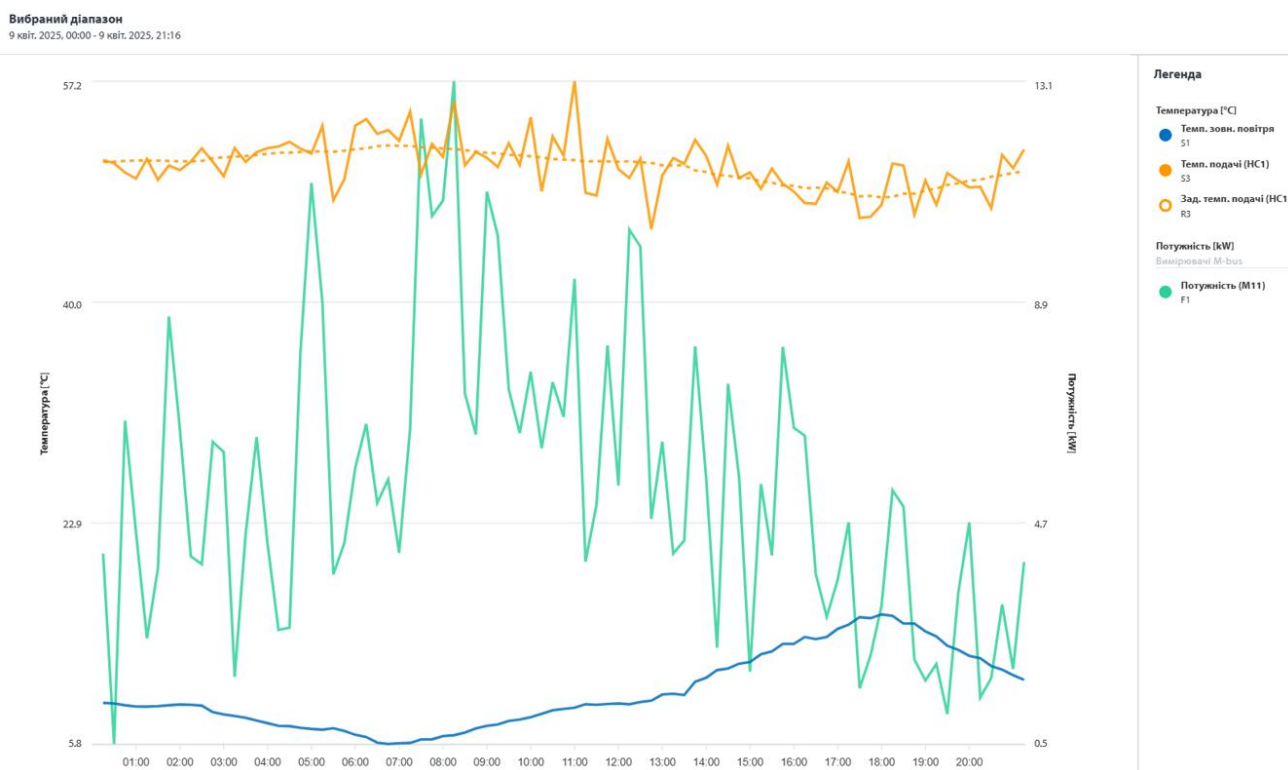


Рис. 3.12 Динаміка температури та теплового навантаження в системі HRU (9 квітня 2025 р.)

На Рис. 3.13, що ілюструє роботу експериментального стенда, температурні відхилення між фактичною та заданою температурою подачі є меншими, ніж у випадку польової системи HRU, що свідчить про вищу якість регулювання. Попри те, що в даний період на експериментальному стенді була активна рекуперація тепла, система зберігала стабільну температуру подачі завдяки узгодженій роботі двох джерел тепла (електричний котел — як імітація теплового насоса, та ЦТ). Це демонструє ефективність реалізованого алгоритму керування, який, навіть в умовах коливань зовнішнього теплового навантаження та перемикань між джерелами, забезпечує стабільну роботу. На відміну від HRU, де в той самий період рекуперація не була активною, експериментальна установка показала кращу динамічну відповідь і температурну стабільність, що є свідченням точного налаштування та більш ефективної реалізації стратегії керування.

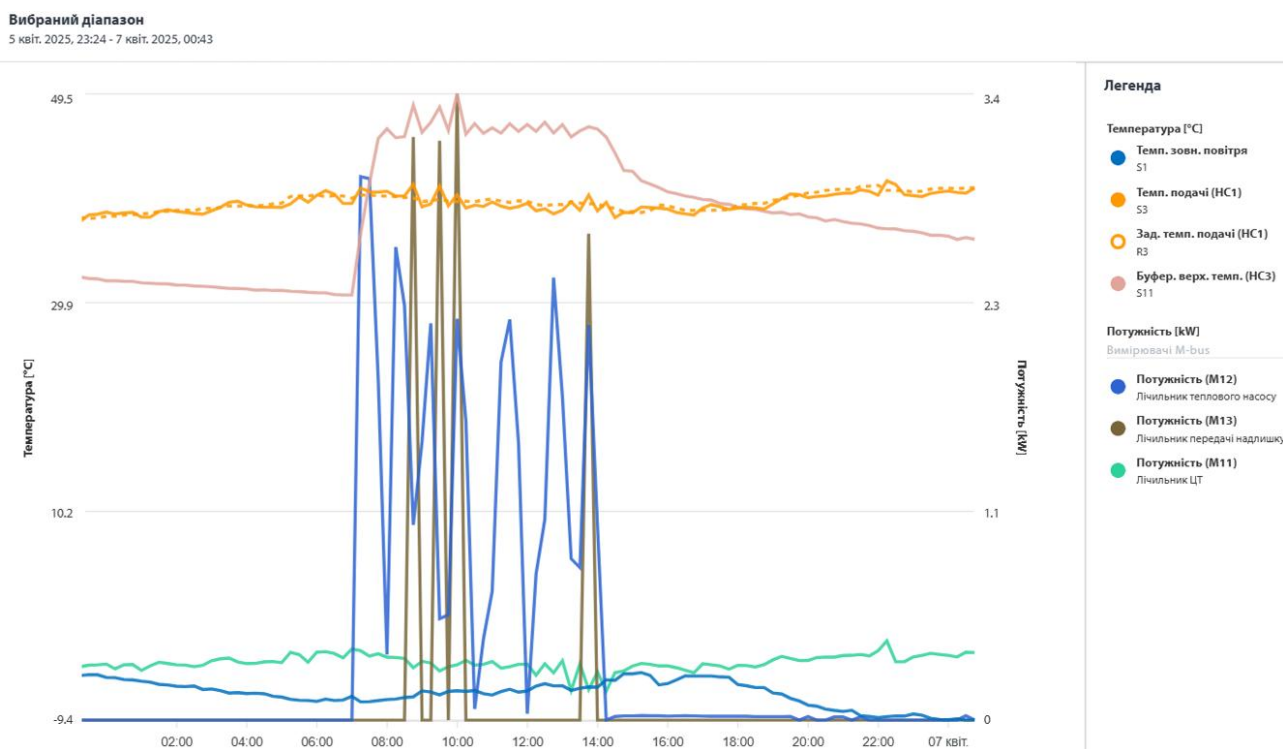


Рис. 3.13 Динаміка температури та теплового навантаження експериментального стенду 2Н-ІТП при комбінованій роботі з ЦТ та локальним джерелом тепла з активною рекуперацією (6–7 квітня 2025 р.)

Проведене порівняння результатів експериментального моделювання 2Н-ІТП із роботою реальної системи рекуперації тепла на базі HRU супермаркету Danfoss Smart Store дозволяє сформулювати такі узагальнення:

1. Функціональна схожість обох систем підтверджується використанням ідентичного програмно-апаратного забезпечення (ECL Comfort 310 з ключем P501), структурною реалізацією двонаправленого теплового потоку, та інтеграцією з централізованим теплопостачанням;
2. У обох системах застосовано автоматичне регулювання на основі температурних датчиків з пріоритетом використання локального джерела тепла (CO₂-холодильного обладнання в HRU та ВДЕ в 2Н-ІТП). Це забезпечує гнучке перемикання між джерелами в залежності від поточного теплового навантаження;
3. HRU демонструє значну динаміку теплових потоків (особливо в межах добових коливань), що є наслідком змін режиму роботи холодильного обладнання. Водночас температурні відхилення подачі від графіка є помітнішими, що свідчить про затримку в дії керуючого приводу клапана M1. Це вказує на необхідність оптимізації швидкості електроприводу (нині — 7,5 с/мм) для забезпечення кращого температурного контролю;
4. У експериментальному стенді 2Н-ІТП, незважаючи на активну роботу рекуперації в досліджуваний період, температурний режим подачі є стабільнішим, а відхилення від розрахункової температури — мінімальними. Це вказує на високу узгодженість між джерелами тепла, ефективність алгоритмів керування та точність регулювання у локальному масштабі;
5. Практична реалізація HRU підтверджує масштабованість і надійність концепції 2Н-ІТП, дозволяючи використовувати надлишкове тепло для згладжування пікових навантажень у ЦТ, зокрема в міжсезоння та при роботі систем ГВП, а також інтегрувати теплові джерела з відновлюваними або вторинними джерелами енергії;
6. У обох досліджених системах (експериментальний 2Н-ІТП та HRU) ключову роль відіграє акумуляція, яка виконує функцію згладжування коливань теплового потоку. Наявність баків-акумуляторів дозволяє компенсувати нерівномірність роботи джерел тепла з варіативним або стохастичним режимом — таких як холодильні установки на CO₂, теплові насоси, сонячні колектори

тощо. Це забезпечує більш стабільне теплопостачання споживача, підвищує ефективність роботи джерел, зменшує кількість перемикачів режимів і покращує якість автоматичного регулювання. Таким чином, акумуляція виступає критично важливою складовою для інтеграції децентралізованих джерел тепла у сучасні керовані теплові системи.

7. Верифікація експериментальних результатів на реальному об'єкті засвідчила відповідність розробленої лабораторної системи до умов реального теплового навантаження і підтвердила ефективність двонаправленого керування як з точки зору температурної стабільності, так і енергетичної адаптивності.

3.5 Висновки

У результаті проведених експериментальних досліджень було підтверджено функціональну ефективність і надійність роботи 2Н-ІТП, реалізованого на базі експериментального стенда. Система забезпечувала автоматичне регулювання потоків теплової енергії між системою ЦТ, локальним джерелом тепла (електричним котлом, що імітує тепловий насос) та споживачем, а також у режимі рекуперації надлишків теплоти назад у мережу ЦТ. Алгоритми погодозалежного керування, реалізовані через електронний регулятор ECL Comfort 310 з програмою P501.1, забезпечили стабільне підтримання температури подачі в системі опалення відповідно до розрахункового графіка з мінімальними відхиленнями.

Наявність бака-акумулятора у складі 2Н-ІТП значно підвищила гнучкість роботи системи, дозволяючи згладжувати добові коливання теплового навантаження. Акумуляція теплової енергії забезпечила не лише стабільність роботи системи в умовах нерівномірної генерації тепла з локального джерела, а й можливість зменшення або повного виключення споживання теплової енергії з ЦТ у моменти достатнього заряджання бака. Така функція є ключовою для інтеграції джерел тепла з нестабільним профілем роботи, зокрема відновлюваних або вторинних джерел енергії.

У режимі рекуперації система 2Н-ІТП забезпечувала повернення надлишкового тепла в мережу ЦТ, при цьому зберігаючи температурну стабільність у контурі опалення. Активація режиму рекуперації відбувалася автоматично при досягненні встановленого температурного порогу в баку-акумуляторі. Передача енергії в зворотному напрямку не погіршувала якість теплопостачання споживача і дозволяла зменшити теплові втрати в мережі, водночас створюючи передумови для компенсації витрат або отримання доходу в майбутньому.

Порівняння з реальною системою рекуперації HRU, впровадженою в супермаркеті Danfoss Smart Store (Denmark, Lundenvej 4, 6430 Nordborg), підтвердило масштабованість і практичну доцільність використання концепції 2Н-ІТП у реальних умовах. Обидві системи використовують схожі принципи керування, ідентичні типи регуляторів (ECL Comfort 310), функцію рекуперації, а також акумуляування тепла. Проте саме в експериментальній моделі було досягнуто вищої точності підтримання температури, що свідчить про ефективність реалізованої логіки керування в умовах лабораторного середовища. У свою чергу, HRU продемонструвала адаптивність до стохастичного джерела тепла (CO₂-холодильне обладнання) і довела доцільність інтеграції таких систем у міську мережу ЦТ з можливістю передачі надлишкової енергії.

В обох випадках важливу роль відігравала акумуляція теплової енергії, яка виступає як згладжуючий елемент при роботі джерел тепла з нерівномірним або переривчастим профілем. Це дозволяє оптимізувати тепловий баланс, уникати частого перемикання між джерелами та забезпечувати стабільність температурного режиму.

Загалом, результати розділу підтверджують, що запропонована система 2Н-ІТП є технологічно ефективним і функціонально гнучким рішенням, здатним забезпечити високу якість теплопостачання при одночасній мінімізації споживання енергії з ЦТ та максимізації використання локальних джерел. Це створює передумови для інтеграції об'єктів з 2Н-ІТП у структуру розумних теплових мереж і трансформації споживача в теплового просьюмера.

РОЗДІЛ 4. МЕТОДИКА ІНЖЕНЕРНИХ РОЗРАХУНКІВ ДВОНАПРАВЛЕНОГО ТЕПЛОВОГО ПУНКТУ

4.1 Схеми-алгоритми роботи

З метою забезпечення ефективного функціонування 2Н-ІТП в умовах змінного теплового навантаження, варіативної доступності джерел тепла та зростаючих вимог до гнучкості теплоспоживання, у цій частині розділу представлено структуровані алгоритмічні схеми для трьох основних режимів роботи. Зокрема, розглядається режим роботи від системи ЦТ, комбінований режим з використанням локального джерела тепла (наприклад, теплового насоса або іншого джерела відновлюваної енергії), а також режим рекуперації надлишкової теплової енергії з можливістю її передачі назад у мережу ЦТ.

Запропоновані блок-схеми дозволяють формалізувати логіку керування роботою обладнання, у тому числі клапанів, циркуляційних насосів, теплових лічильників та датчиків температури, які є ключовими елементами в реалізації адаптивного керування. У схемах враховано взаємодію між компонентами системи залежно від фактичних та розрахункових температурних параметрів, що забезпечує стабільну подачу тепла в систему опалення, а також ефективне переключення між джерелами залежно від техніко-економічної доцільності та умов роботи.

Режим роботи від системи ЦТ (Рис. 4.1). У цьому режимі джерелом теплопостачання для системи опалення виступає мережа ЦТ, що забезпечує базове покриття теплових навантажень будівлі.

Робота системи починається з активації циркуляційного насоса Р1, що забезпечує циркуляцію теплоносія в контурі споживача, після чого відбувається відкриття клапана М2, через який теплоносій із системи ЦТ подається через теплообмінник у контур опалення..

Контроль температури в подаючому трубопроводі здійснюється за допомогою температурного датчика, а отримане значення порівнюється з розрахунковою температурою, сформованою на основі температурного графіка. У разі досягнення або перевищення заданої температури клапан М2 закривається

або призупиняє подачу теплоносія, що запобігає перегріву системи та сприяє підтриманню оптимального мікроклімату.

Усі процеси супроводжуються фіксацією обсягів переданої теплоти за допомогою теплового лічильника М11, що дозволяє оцінити енерговитрати та забезпечити точний облік енергоспоживання для подальшого аналізу. Цей режим забезпечує стабільну роботу системи опалення у разі відсутності або недостатньої ефективності локальних джерел тепла.

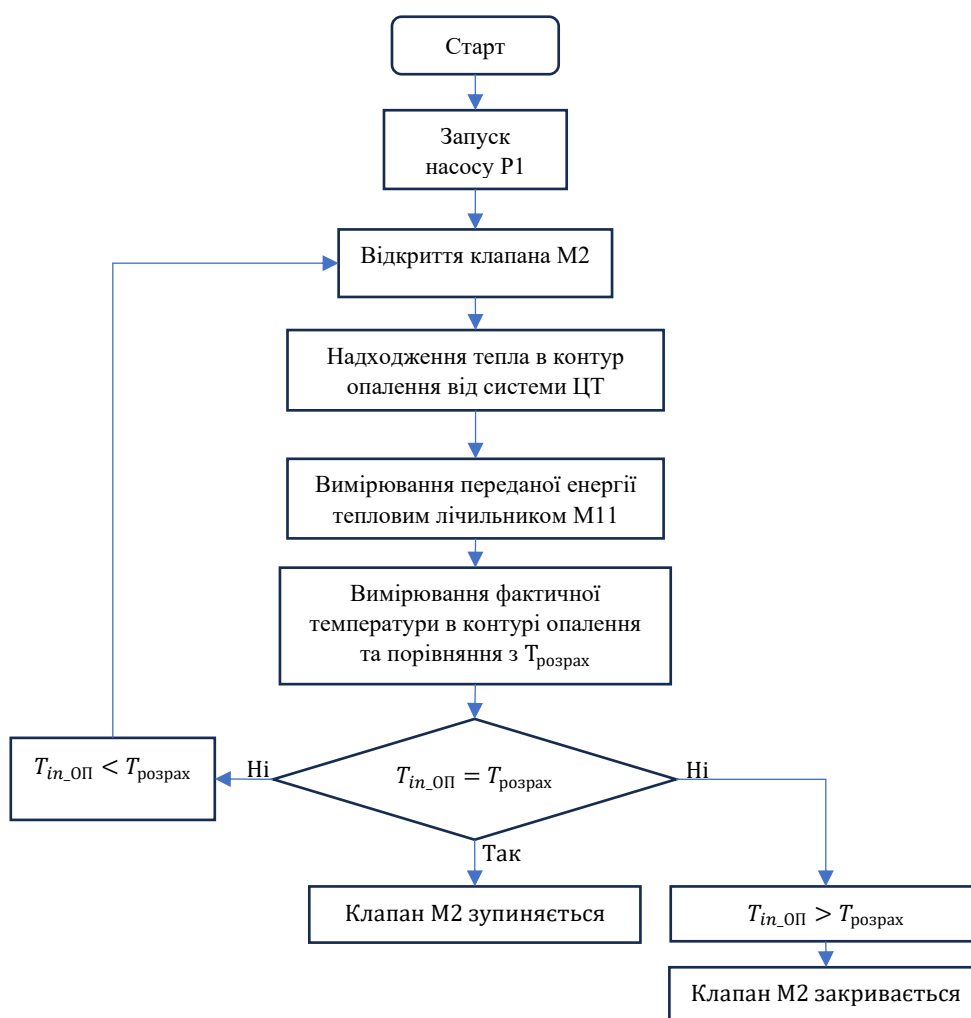


Рис. 4.1. Алгоритм роботи 2Н-ІТП у режимі тепlopостачання від системи ЦТ

Комбінований режим або робота виключно від локального джерела тепла (Рис. 4.2). Даний режим реалізується за наявності скидного тепла або сприятливих умов для роботи відновлюваних джерел енергії (ВДЕ), наприклад, коли прогнозована температура зовнішнього повітря або дані розкладу роботи теплового насоса дозволяють ефективне використання локального джерела. У

такому випадку система переходить у режим попереднього накопичення енергії в баку-акумуляторі.

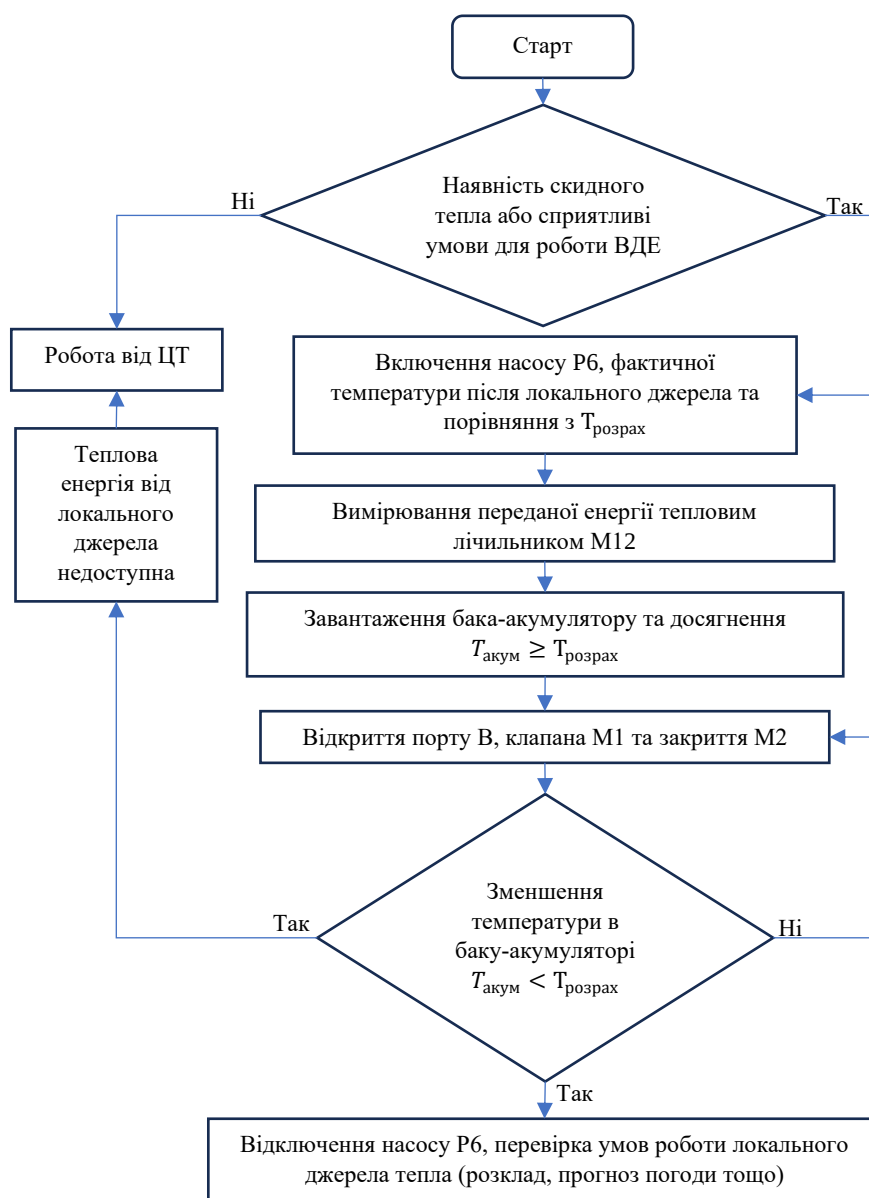


Рис. 4.2. Алгоритм роботи 2Н-ІТП у комбінованому режимі або режимі роботи виключно від локального джерела

Після верифікації умов запускається насос Р6, і теплова енергія від локального джерела подається через відповідний теплообмінник у бак-акумулятор. Передана енергія фіксується тепловим лічильником М12, а температура в баку контролюється датчиком S11 ($T_{\text{акум}}$). У разі досягнення розрахункової температури ($T_{\text{акум}} \geq T_{\text{розрах}}$), система переходить до постачання теплової енергії в систему опалення споживача з бака-акумулятора:

відкривається порт В і клапан М1, а клапан М2, через який тепла енергія надходить з системи ЦТ, закривається.

Таким чином, система повністю або частково забезпечує опалення за рахунок локального джерела, не залучаючи централізоване джерело. У разі подальшого зменшення температури в баку нижче допустимого рівня ($T_{\text{акум}} < T_{\text{розрах}}$), насос Р6 вимикається, і система повторно перевіряє умови для роботи ВДЕ. Якщо вони не задовольняють вимог, система автоматично перемикається (збільшується обсяг) на роботу від системи ЦТ. У такий спосіб реалізується гнучке перемикання між джерелами тепла залежно від умов, доступності енергії та температурного графіка.

Режим рекуперації надлишкової теплової енергії в мережу централізованого теплопостачання (Ри.4.3). Режим рекуперації теплової енергії є одним із ключових функціональних сценаріїв роботи 2Н-ІТП, який дозволяє реалізувати концепцію теплового просьюмера. Даний режим активується у випадках, коли після попереднього етапу заряджання бака-акумулятора від локального джерела (наприклад, теплового насоса, сонячного колектору або іншого ВДЕ), температура теплоносія у верхній зоні бака перевищує встановлений поріг ($T_{\text{поріг}, f_{\text{рекуп}}}$). У проєктних межах цей поріг визначено на рівні 48 °С.

Якщо температура перевищує порогове значення, система переходить у режим рекуперації. Відбувається автоматичне включення насосів Р10, які забезпечує циркуляцію надлишкового теплоносія через теплообмінник у напрямку системи ЦТ. Паралельно з цим здійснюється вимірювання та облік переданої теплової енергії за допомогою теплового лічильника М13. Управління даним процесом здійснюється на основі температурної інформації, отриманої з датчиків S11 (верхня зона бака).

Передача теплової енергії триває до того моменту, поки температура у верхній частині бака зберігається на рівні, вищому за ($T_{\text{поріг}, f_{\text{рекуп}}}$). Якщо внаслідок зниження інтенсивності роботи локального джерела або підвищеного

споживання температура падає нижче встановленого рівня порогу, система автоматично припиняє рекуперацію — насос P10 вимикається.

Таким чином, режим рекуперації надлишкового тепла реалізує ефективну модель енергетичної інтеграції 2Н-ІТП у міську теплову інфраструктуру, з урахуванням коливного характеру роботи локального джерела, часової динаміки навантажень, та температурної стратифікації теплоносія у баку-акумуляторі. Він не лише підвищує ефективність експлуатації всієї системи, але й забезпечує гнучкість адаптації до змін теплового навантаження та зовнішніх умов, що є необхідною умовою для розвитку інтелектуальних енергетичних мереж.

Алгоритмічні схеми, що відображають логіку функціонування 2Н-ІТП охоплюють три ключові режими роботи системи: робота від системи ЦТ, комбінована або автономна робота від локального джерела тепла, а також режим рекуперації надлишкової теплової енергії в мережу ЦТ. Побудовані блок-схеми описують повну логіку роботи системи з урахуванням температурних параметрів теплоносія, взаємодії ключових елементів (насосів, клапанів, теплових лічильників), а також умов переходу між режимами.

Алгоритми забезпечують адаптивність системи до змінного теплового навантаження, впливу зовнішніх температур, а також наявності сприятливих умов для роботи відновлюваних джерел або скидного тепла. Особлива увага приділена доцільному порядку перемикання між джерелами тепла, що дозволяє зменшити споживання енергії з системи ЦТ і максимально задіяти локальні джерела. Пріоритет використання локального джерела із заряджанням бака-акумулятора, в поєднанні з температурним контролем, забезпечує гнучкість системи та її енергоефективність навіть при коливаннях теплового навантаження.

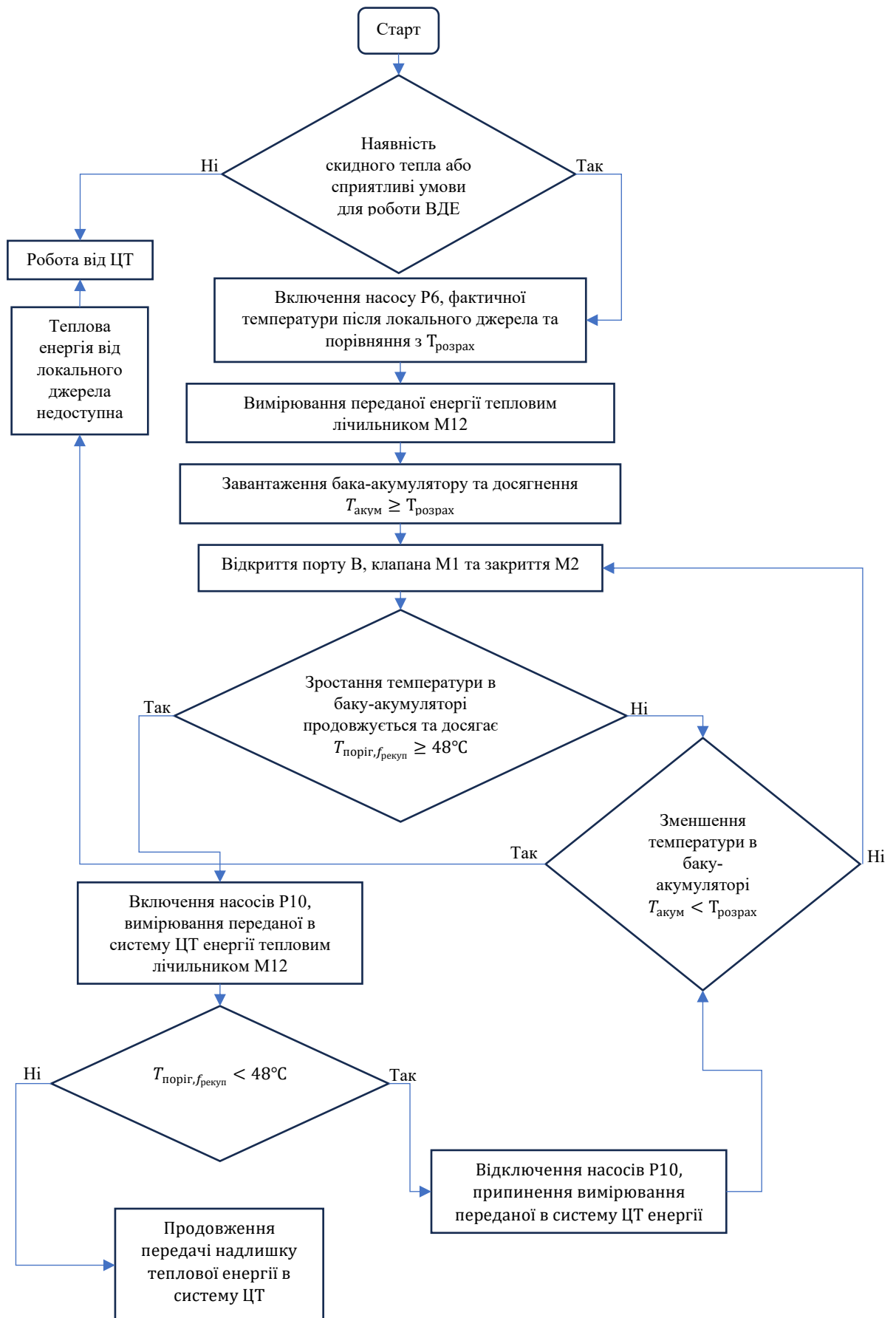


Рис. 4.3. Алгоритм роботи 2Н-ІТП у режимі рекуперації надлишкової теплової енергії в мережу ЦТ

Розроблені алгоритми вже реалізовані у програмній логіці електронного регулятора, що використовувався під час проведення експериментальних досліджень, і забезпечують автоматизовану роботу системи в усіх передбачених режимах. Подальший розвиток таких рішень передбачає поглиблення аналітичних можливостей — зокрема, впровадження прогнозного управління джерелами тепла на основі метеорологічних даних, аналізу ефективності роботи обладнання та динаміки зміни енергетичних тарифів. Інтеграція цих функцій у хмарні сервіси моніторингу та керування дозволить досягти вищого рівня адаптивності та економічної ефективності системи в умовах сучасних вимог до гнучкого теплоспоживання.

4.2 Теплотехнічні характеристики

У цій частині роботи розглянуто теплотехнічні характеристики ключових елементів 2Н-ІТП, розробленого автором у межах дисертаційного дослідження. Запропонована система реалізує концепцію інтеграції кількох джерел теплопостачання —ЦТ та локального джерела тепла, здатного виробляти тепло з використанням ВДЕ або джерел скидного тепла. Особливістю конструкції є можливість не лише комбінованої роботи від декількох джерел, а й рекуперації надлишкового тепла в зворотному напрямку до мережі ЦТ, що підвищує загальну ефективність та економічну доцільність функціонування теплового пункту.

Зважаючи на складність гідравлічного компонування, велику кількість елементів автоматики, датчиків та виконавчих механізмів, реалізація такого рішення в реальних умовах можлива виключно у форматі промислового виготовлення. Усі експериментальні та модельні розрахунки були виконані з урахуванням специфікацій, що відповідають типовим виробничим стандартам компанії Danfoss, яка має налагоджену технологічну базу для збирання, тестування та введення в експлуатацію подібних систем. На практиці, лише повністю заводське виконання із використанням модульних вузлів та

гарантованої точності збирання здатне забезпечити належний рівень надійності, безпеки та відповідності технічним умовам.

Окремі схемні рішення, зокрема ті, що стосуються автоматичного перемикання між режимами, реалізації алгоритмів рекуперації або прогнозного керування, перебувають на стадії дослідної експлуатації та поступово вдосконалюються на основі практичних спостережень і результатів симуляцій. Відтак, представлена теплотехнічна характеристика охоплює не лише параметри компонентів, але й опис динаміки їхньої взаємодії, що забезпечує базу для подальшого техніко-економічного обґрунтування та практичної реалізації 2Н-ІТП нового покоління.

Теплообмінники НХ 1 та НХ 2. У 2Н-ІТП використано два високоефективні пластинчасті теплообмінники Danfoss типу XB-series (модель XB59M для потужностей до ~540 кВт). Теплообмінники виготовлені з нержавіючої сталі (сталь 1.4404) з мідним паянням пластин, що забезпечує високий коефіцієнт теплопередачі при компактних розмірах. Кожен теплообмінник виконує свою функцію: перший (НХ 1) застосовується для передачі тепла від мережі ЦТ до контуру опалення споживача, другий (НХ 2) – для передачі надлишків тепла в мережу ЦТ.

В розроблених концепція 2Н-ІТП застосовуються, як правило, саме паяні пластинчасті теплообмінники завдяки їхній компактності, високому коефіцієнту теплопередачі та здатності працювати при значному перепаді тисків. Такий тип теплообмінників дозволяє ефективно забезпечувати як прийом теплової енергії, так і її повернення до мережі ЦТ. При цьому характерна для них низька температурна різниця між первинним і вторинним контурами (зазвичай у межах 3–5 °С) сприяє мінімізації втрат ексергії та підвищенню загальної ефективності в умовах змінного теплового навантаження.

Теплообмінники створюють певний гідравлічний опір (типово десятки кПа при розрахунковій витраті), що враховується при виборі насосів. Оскільки контури розділені, теплообмінники забезпечують гідравлічну незалежність елементів системи. Така схема підвищує надійність і безпеку, адже в разі великих

перепадів тиску, коливань тиску чи аварій в мережі ЦТ, вторинний контур будівлі захищений, як і елементи у внутрішній системі, які можуть мати менший номінальний тиск. Крім того, розділення контурів уможливлює двонаправлену роботу: за потреби надлишкове тепло з локального контуру може через окремий теплообмінник спрямовуватися назад у мережу (режим рекуперації тепла).

Як ілюстративний приклад використано креслення, габаритні розміри та заводську теплоізоляцію теплообмінника Danfoss XB-59M-1-30, що представлено на Рис. 4.4. Зазначений теплообмінник є типовим представником обладнання, що застосовується у промислових та комерційних ІТП, включаючи 2Н-ІТП та HRU. Заводське виконання із захисною оболонкою дає змогу мінімізувати теплові втрати, спрощує монтаж та забезпечує довготривалу герметичність з'єднань.

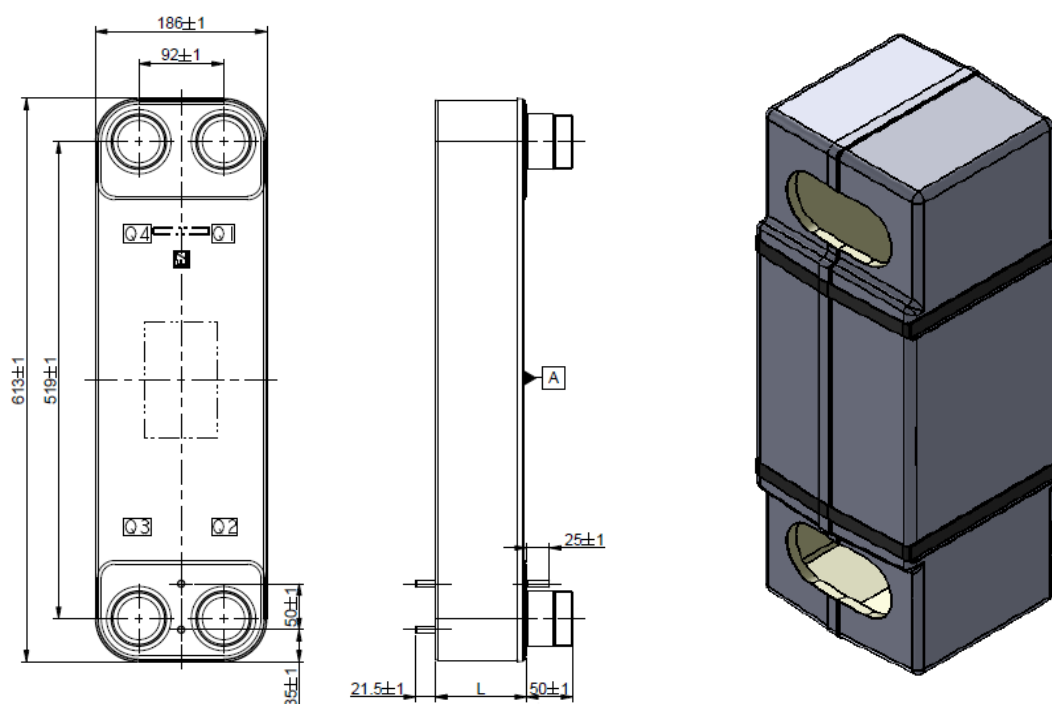


Рис. 4.4 Загальний вигляд, габаритні розміри та тепла ізоляція паяного пластинчастого теплообмінника Danfoss XB59M-1-30

Регулювальні клапани M1 та M2. Для керування потоками теплоносія в системі 2Н-ІТП використано регулювальні клапани Danfoss з електроприводами (Рис.4.5), що застосовуються для регулювання витрати теплоносія, шляхом зміни

власного гідравлічного опору під дією регулювального елементу – електропривода.

У якості триходового клапана M1, що забезпечує надходження теплової енергії від локального джерела та змішування потоків від системи ЦТ та локального джерела у випадку роботи в комбінованому режимі, використано клапан VRB3 у комбінації з електроприводом AMV 435 або AMV 25. Особливістю цього клапана є логарифмічна витратна характеристика по ходу А–АВ та лінійна по В–АВ, що забезпечує високу точність регулювання у внутрішньому контурі. Така характеристика дає змогу стабільно регулювати теплові потоки за умов динамічного споживання, особливо під час перемикання між напрямками подачі тепла.

Клапан M2, встановлений у ділянці подачі теплоносія з боку системи ЦТ, представлений комбінованим клапаном AVQM із функцією автоматичного обмеження витрати. Цей пристрій має вбудований регулятор прямої дії, який підтримує стабільну витрату незалежно від змін тиску в мережі. Клапан AVQM має логарифмічну витратну характеристику, яка в поєднанні з характеристиками теплообмінника та заводського значення авторитету клапана $\alpha \approx 1$ забезпечує лінійне регулювання теплового потоку. Це дозволяє досягти режиму, близького до ідеального змішування, що позитивно впливає на стабільність температури в контурі опалення.



Рис. 4.5 Регулювальні клапани, застосовані в 2Н-ІТП: AVQM (зліва) з автоматичним обмеженням витрати та VRB3 (справа)

Обидва клапани характеризуються низьким коефіцієнтом протікання (не більше 0,05 % від K_{vs}), що забезпечує ефективну гідравлічну ізоляцію в режимах закриття. Керовані електронним регулятором, клапани M1 та M2 динамічно змінюють положення під дією електричних приводів, забезпечуючи підтримання розрахункових температур у контурі опалення з високою точністю незалежно від режиму роботи системи.

Насосне обладнання (P1, P4, P6, P10) та гідравлічні аспекти роботи. У конструкції 2Н-ІТП передбачено використання п'яти незалежних циркуляційних насосів, кожен із яких працює в окремому гідравлічному контурі. Усі насоси мають електронне регулювання частоти обертів і відповідають вимогам енергоефективності на рівні індексу $EEl \leq 0,23$. У практичній реалізації систем перевага надається високоефективним циркуляційним насосам типу Wilo Stratos Махо або Grundfos Magna 3, які забезпечують гнучке й адаптивне керування витратою відповідно до змінного теплового навантаження. Циркуляційні насоси виконують наступні задачі:

- P1 — циркуляційний насос системи опалення, забезпечує сталий рух теплоносія до опалювальних приладів споживача;
- P4 — циркуляційний насос, який здійснює подачу тепла з бака-акумулятора до системи опалення в режимі пріоритету локального джерела;
- P6 — циркуляційний насос, що активується під час роботи теплового насоса або іншого локального джерела для зарядження бака-акумулятора;
- P10 — пара циркуляційних насосів до та після теплообмінника НХ2, які забезпечують відбір і передачу надлишкової теплової енергії назад до мережі ЦТ у режимі рекуперації.

Усі насосні агрегати забезпечують плавне регулювання продуктивності в залежності від поточного режиму, що дозволяє не лише мінімізувати споживання електроенергії, а й уникати надмірного зносу обладнання. Вони проєктуються з урахуванням розрахункового діапазону витрат і напору, що визначається характеристиками системи: втратою тиску на теплообмінниках (НХ1, НХ2,

теплообміннику бака-акумулятора), запірній і регулювальній арматурі (M1, M2), теплових лічильниках, трубопроводах та елементах вторинного контуру.

Для прикладу, при витраті 3,9 м³/год у трубопроводі DN50, гідравлічний опір може складати 20–40 кПа на кожні 100 м довжини, залежно від шорсткості та кількості фітингів. Додатково, падіння тиску на паяному пластинчастому теплообміннику XB59M становить 15–30 кПа, а на клапанах типу AVQM або VRB3 — від 20–50 кПа.

Для забезпечення надійної багаторежимної роботи, насоси мають вбудовані функції захисту від сухого ходу, перегріву, гідравлічного удару та інші критично важливі засоби самодіагностики. Крім того, електронний контролер ECL Comfort 310 може реалізовувати PWM-регулювання для насоса P6, що завантажує бак-акумулятор теплом від локального джерела. Це забезпечує динамічну адаптацію витрати до температурних і гідравлічних умов з високою точністю.

Для запобігання зворотним потокам і гідравлічній взаємодії контурів під час зупинки окремих насосів у схемі передбачено зворотні клапани, що гарантують гідравлічну стабільність і надійність перемикання режимів.

Таким чином, правильно підібрана насосна група в складі 2Н-ІТП дозволяє:

- забезпечити стабільну подачу тепла до споживачів незалежно від режиму роботи;
- реалізувати енергоефективну циркуляцію в умовах часткового навантаження;
- гідравлічно збалансувати подачу тепла з декількох джерел (ЦТ, ВДЕ);
- забезпечити плавну передачу надлишкової енергії в мережу ЦТ без гідравлічної нестабільності чи надлишкових втрат тиску.

Трубопроводи та гідравлічна інфраструктура. У конструкції 2Н-ІТП використано сталеві трубопроводи номінальним діаметром від DN15 до DN65, підібрані відповідно до теплового навантаження та гідравлічних характеристик

окремих контурів. Діаметри обрано з урахуванням розрахункових витрат: більший діаметр дає змогу пропускати потрібний об'єм теплоносія при нижчій швидкості руху, зменшуючи опір і втрати напору. Наприклад, максимальна конфігурація 2Н-ІТП (≈ 540 кВт теплового навантаження доступна на даний момент) передбачає підключення до мережі ЦТ трубопроводами DN65; при цьому розрахункова витрата може становити $\sim 20\text{--}25$ м³/год (в залежності від температурного графіка), що відповідає швидкості потоку $\sim 1,5\text{--}2$ м/с в трубі DN65 – цілком прийнятне значення для уникнення ерозії і шуму.

Для контурів середньої потужності (200–300 кВт) застосовуються трубопроводи DN50, а допоміжні ділянки, що працюють з меншими витратами, виконуються трубами діаметром DN15–DN32. Такий підхід дозволяє забезпечити необхідну пропускну здатність при мінімальних втратах тиску, що критично важливо для підтримання стабільної роботи регулювальних клапанів та насосного обладнання.

Окрім гідравлічного опору, трубопроводи впливають на теплову інерцію системи: більший діаметр забезпечує більший об'єм теплоносія, що додатково згладжує температурні коливання. Хоча для локального джерела доступне акумулювання, об'єм води в трубах також бере участь у згладжуванні навантажень, особливо в контексті короточасних змін теплової потужності.

Матеріал труб — сталь, сертифікована на робочий тиск не менше 10–16 бар та температуру до 100 °С, що забезпечує надійність і відповідність умовам експлуатації. З'єднання труб DN50 та менших виконані різьбовими, DN65 — фланцевими, згідно з чинною технічною практикою монтажу ІТП.

Всі трубні ділянки теплоізовано відповідно до вимог енергоефективності: термоізоляція мінімізує теплові втрати в навколишнє середовище, підвищуючи загальний ККД 2Н-ІТП та сприяючи збереженню балансу теплової енергії в системі.

Датчики температури S2, S3, S4, S5, S7, S11, S12 та їх чутливість.
Система обладнана сімома датчика температури, розташованими у ключових

точках: на подаючих і зворотних трубопроводах обох контурів, на виході теплообмінників, у верхній та нижній частинах бака-акумулятора, а також зовнішній датчик температури зовнішнього повітря (для погодозалежного регулювання). Як вимірювальні елементи застосовано платинові термометри опору типу Pt1000, які забезпечують високу точність і стабільність вимірювання. Всі датчики відповідають класу точності EN 60751 Class B, тобто їх похибка не перевищує $\pm 0,3$ °C при 0 °C (і близько ± 1 °C в діапазоні 100 °C).

Висока чутливість датчиків дозволяє контролеру фіксувати навіть незначні коливання температури. Крім того, датчики мають малу інерційність: типові занурювальні датчики (наприклад, ESMU-100) характеризуються постійною часу близько 2 с у воді, що означає – через 2 секунди датчик реагує на ~63% величини раптової зміни температури. Така швидка реакція мінімізує запізнювання в системі регулювання і підвищує динамічну стабільність. Датчики змонтовані в гільзах в потоці теплоносія для кращого теплообміну; їх робочий діапазон температур значно перевищує номінальні режими системи (зазвичай датчики розраховані на температуру до +140 °C) і витримують високий тиск (до 25 бар), тому запас міцності великий.

Правильне функціонування датчиків є критично важливим для ефективності: електронний регулятор ECL Comfort постійно порівнює виміри температур з заданими значеннями і коригує роботу клапанів та насосів. Якщо б датчики мали значний дрейф чи повільну реакцію, це призвело б до перерегулювання – наприклад, перегріву теплоносія понад необхідне або до коливань температури в приміщеннях. На практиці ж висока точність забезпечує сталість параметрів: температура подачі підтримується в межах допуску, втрати тепла мінімізуються, а використання теплової енергії оптимізується.

Взаємозв'язок компонентів і режими роботи системи. Усі перелічені компоненти інтегровані в єдину систему, роботою якої керує електронний регулятор. Алгоритми керування налаштовано на підтримання ефективності та стабільності в різних режимах функціонування: від споживання тепла з мережі

ЦТ до повної автономної роботи і віддачі надлишку енергії. Нижче розглянуто роботи 2Н-ІТП в основних режимах:

Режим роботи від системи ЦТ. У режимі роботи 2Н-ІТП від системи ЦТ будівля отримує теплову енергію від зовнішньої тепломережі через теплообмінник НХ 1. Регулювання подачі теплоносія здійснюється за допомогою незалежного від перепаду тиску регулювального клапана М2 з функцією автоматичного обмеження витрати. Цей клапан відкривається на відповідну величину, забезпечуючи такий об'єм теплоносія у первинному контурі, який дозволяє досягти заданої температури подачі у вторинному контурі на виході з теплообмінника.

Задане значення температури формується електронним регулятором згідно з погодозалежним температурним графіком: зі зниженням температури зовнішнього повітря підвищується температура подачі у систему опалення, і навпаки — при потеплінні вона знижується до мінімально необхідного рівня. Для цього використовується сигнал з датчика S1, що вимірює зовнішню температуру, тоді як датчики S3 і S7 контролюють температуру подачі та зворотного теплоносія відповідно у вторинному контурі.

Циркуляцію теплоносія по системі опалення будівлі забезпечує насос Р1. Особливу увагу приділено температурному перепаду $\Delta T = T_{\text{подачі}} - T_{\text{зворотки}}$, адже він є індикатором ефективності тепловикористання: чим нижчою є температура зворотного потоку (за показником датчика S7), тим повніше реалізовано теплотехнічний потенціал первинного контуру і тим вищий коефіцієнт корисного використання енергії з ЦТ.

Для підвищення ефективності електронний регулятор може включати функцію обмеження температури зворотного теплоносія, що унеможливорює повернення теплоносія в магістраль з перевищенням температурних параметрів, визначених теплопостачальною організацією. Це дозволяє досягти глибшого охолодження мережевої води, знизити теплові втрати і дотриматись умов технічного приєднання.

Завдяки наявності високоточного регулювального клапана M2, 2Н-ІТП демонструє стійку роботу навіть за умов динамічних змін у тепловому навантаженні чи гідравлічному режимі системи. У разі коливань температури електронний регулятор оперативно коригує ступінь відкриття клапана, забезпечуючи стабільне підтримання заданих параметрів у вторинному контурі.

Режим роботи локального джерела тепла. У разі недоступності ЦТ — наприклад, під час аварійного відключення або у міжсезонний період — 2Н-ІТП автоматично переходить у режим автономного теплозабезпечення. У цьому режимі джерелом теплової енергії слугує локально розміщений генератор тепла, що використовує або ВДЕ, або скидне тепло. В експериментальному стенді функцію локального джерела виконує електричний котел, який імітує роботу теплового насоса, подаючи теплоносії для зарядження бака-акумулятора.

У відповідь на зміну температури зовнішнього повітря (датчик S1) і рівень зарядженості бака-акумулятора (датчики S11 — верх бака, і S12 — низ), електронний регулятор закриває клапан M2 (відсікаючи потік з боку ЦТ) і відкриває порт В триходового клапана M1. В результаті, тепла енергія з бака-акумулятора надходить у контур опалення. Насос P4 забезпечує циркуляцію теплоносія між баком і споживачами тепла в будівлі.

Зарядження бака відбувається за допомогою насоса P6, який прокачує теплоносії через локальне джерело (умовно — тепловий насос) і подає його до теплообмінника акумулятора. Верхній шар бака (контроль температури — датчик S11) зазвичай нагрівається до температур 60–80 °С, залежно від режиму опалення. Завдяки значній тепловій інерції акумулятора, система здатна стабільно працювати навіть при нестабільному тепловому потоці від локального джерела (наприклад, у разі циклічної роботи компресора теплового насоса).

Електронний регулятор безперервно оцінює поточну ситуацію за температурними датчиками:

- S4 — температура на лінії зарядки;
- S11 — температура верхньої зони бака;
- S12 — температура в нижній частині бака;

- S3 — температура подачі до споживача.

Це дозволяє регулятору гнучко керувати насосами P1 (вторинний контур) і P6 (зарядка), а також, за потреби, активувати або деактивувати локальне джерело тепла. Якщо потужності джерела виявляється недостатньо (наприклад, під час пікових режимів роботи), система може частково відкрити клапан M2 для підмішування теплоносія з ЦТ, переходячи до комбінованого режиму.

У повністю автономному режимі система розрахована на роботу до рівня проектного теплового навантаження. Гідравлічний розподіл контурів, швидкодійний електронний контроль і буферна здатність бака забезпечують стійку роботу та рівномірне теплопостачання. Навіть за коливань теплової потужності локального джерела температура на подачі (S3) залишається стабільною, що дозволяє уникнути температурних провалів або перегрівів у споживачів. У разі зниження температури в системі опалення та відсутності доступу до основних джерел (ЦТ або локального теплогенератора), регулятор може активувати резервне джерело тепла (електричний котел, газовий пальник чи мікро-КГУ) для стабілізації роботи системи.

Режим рекуперації тепла (експорт надлишкової енергії в мережу ЦТ). Однією з ключових функціональних особливостей 2Н-ІТП є здатність передавати надлишкову теплову енергію, згенеровану локальним джерелом, назад до мережі ЦТ. Такий режим активується за умов, коли теплова потужність, що надходить від локального джерела, перевищує поточне споживання будівлі, а бак-акумулятор вже досягнув заданої верхньої температури (контроль за допомогою датчика S11).

У момент активації рекуперації електронний регулятор ініціює запуск насосів P10 та циркуляцію теплоносія через теплообмінник НХ2. Один із насосів P10 забезпечує циркуляцію теплоносія в контурі передачі тепла до теплообмінника НХ2, тоді як другий передає теплову енергію до мережі ЦТ, що відповідає алгоритмам роботи 2Н-ІТП.

Регулятор постійно контролює умови експорту: температура в бак-акумуляторі (S11, S12), витрату (за лічильником M13) і тиск у контурі. При

цьому робота насосів P10 керується відповідно до заданого перепаду тиску або, при технічній можливості, за температурою. Це дає змогу підтримувати оптимальні гідравлічні параметри та уникати зворотних потоків або гідроударів. Для забезпечення якості передачі може бути задане обмеження температури експорту (наприклад, $\geq 48\text{ }^{\circ}\text{C}$, як це було раніше розглянуто під час проведення теплофізичного експерименту), нижче якого подача тепла в ЦТ автоматично блокується.

Процес експорту балансується в реальному часі: якщо температура в баку знижується до рівня $T_{\text{рекуп}}$ ($S11 < T_{\text{рекуп}}$), регулятор припиняє роботу насосів P10, зберігаючи тепло для власних потреб будівлі. Одночасно відбувається корекція навантаження локального джерела, а в разі потреби система повертається в режим теплоспоживання або комбінованої роботи.

Таким чином, режим рекуперації реалізується з урахуванням трьох взаємопов'язаних умов:

- наявності надлишку тепла в системі;
- відповідної температури в баку-акумуляторі;
- гідравлічної сумісності з поточними параметрами мережі ЦТ.

Завдяки автоматизованому керуванню, система 2Н-ІТП виконує динамічне балансування між виробництвом, споживанням та експортом теплової енергії. Це забезпечує її високу енергоефективність, гнучкість і надійність за умов реальних експлуатаційних навантажень.

Теплова інерція бака-акумулятора. У складі представленого 2Н-ІТП використано один буферний бак-акумулятор, який відіграє ключову роль у згладжуванні динаміки теплових навантажень та балансуванні виробництва і споживання теплової енергії. Завдяки воді, що використовується як теплоакумуюче середовище, бак здатен ефективно накопичувати надлишкову теплову енергію або віддавати її в разі потреби без миттєвої реакції з боку локального джерела тепла.

У режимі локального теплозабезпечення бак дозволяє компенсувати теплове навантаження будівлі, навіть якщо локальне джерело тепла працює з

перервами або циклічно (характерно для систем із скидним теплом чи ВДЕ). Стабільність температури в контурі забезпечується за рахунок термошарування: верхній датчик температури S11 контролює температуру подачі в систему опалення, нижній S12 – динаміку охолодження та залишковий тепловий потенціал у баку. При зростанні навантаження бак миттєво компенсує дефіцит тепла, охолоджуючись, але при цьому забезпечуючи стабільну температуру подачі до моменту реакції електронного регулятора на зміни температури (відкриття клапана M2 та початку передачі енергії від системи ЦТ або активації локального джерела тепла та насосу P6 для поновлення завантаження бака-акумулятора).

У разі надлишку тепла (наприклад, під час піку генерації, що формується під час роботи теплового насосу, центру обробки даних, холодильного обладнання тощо) бак акумулює надлишкову енергію, попереджаючи вимкнення компресора або зупинку циклу. Таким чином досягається зниження кількості циклів ввімкнення-вимкнення, зменшення зносу елементів і підвищення ресурсу обладнання.

Бак також відіграє критично важливу роль у забезпеченні безпеки системи. У випадках раптової зупинки циркуляції або різкого падіння споживання він здатен тимчасово акумулювати вироблену енергію, знижуючи ризик перегріву або активації аварійного скиду через запобіжні клапани. Таким чином, навіть при роботі з високотемпературними джерелами (60–80 °C), система залишається стабільною.

Загалом, теплова інерція бака-акумулятора виконує роль демпфера в 2Н-ІТП, забезпечуючи:

- гнучке балансування між виробництвом і споживанням тепла;
- захист обладнання від пікових навантажень;
- стабільну температуру теплоносія в системі опалення;
- підвищення загального ККД системи за рахунок роботи джерел в оптимальних умовах.

Робочі параметри та налаштування електронного регулювання. Система 2Н-ІТП проєктується з урахуванням стандартних експлуатаційних параметрів теплоносія як для ЦТ, так і для внутрішньої системи опалення будівлі. На стороні ЦТ (первинний контур) передбачається робочий тиск до 16 бар, що відповідає вимогам низько- та середньотемпературних теплових мереж (PN16). Вторинний контур функціонує на нижчому тиску – зазвичай у межах 3–6 бар, але в окремих конфігураціях може досягати 6–10 бар залежно від висоти будівлі та типу розширювального бака. Всі елементи системи (теплообмінники, клапани, насоси) розраховані на роботу з тисками до PN10–16, що забезпечує достатній запас міцності та безпечну експлуатацію.

Максимальна температура на подачі з боку ЦТ становить до 90 °С, що відповідає сучасним концепціям низькотемпературного теплопостачання. Хоча в окремих випадках можливі мережі з температурами до 110–130 °С, у розробленій конфігурації 2Н-ІТП використовуються компоненти, оптимізовані саме під роботу з низькотемпературними мережами. У вторинному контурі температура подачі зазвичай не перевищує 80 °С при найбільших навантаженнях. Допустимі температури в баку-акумуляторі зазвичай обмежуються значенням до 90 °С, при цьому у реальних умовах його верхній шар (датчик S11) має цільову уставку в межах 60–80 °С.

Керування температурними режимами та станами системи здійснюється за допомогою електронного регулятора ECL Comfort 310, у якому реалізовано спеціалізовану програму керування типу P510.1 або P501.2. Основними налаштовуваними параметрами є:

- Температурний графік опалення, що задає залежність температури подачі від температури зовнішнього повітря;
- Цільова температура верхнього шару баку-акумулятора, встановлена з урахуванням розрахункової температури подачі теплоносія в систему опалення;

- Гістерезис перемикання між режимами, який встановлюється для уникнення частих перемикань джерел через незначні температурні коливання (1–2 °C).
- Температурний поріг для початку експорту тепла, наприклад 48 °C, що визначає мінімально допустиме значення для активації режиму рекуперації.
- Часові розклади роботи, які дозволяють реалізувати зниження температур у нічні години або у вихідні, а також забезпечити своєчасне повернення до комфортного режиму.
 - Функції безпеки, що включають обмеження температури зворотки при роботі від ЦТ, сигналізацію при перевищенні допустимої температури в баку чи порушення циркуляції.

Правильне налаштування всіх цих параметрів проводиться під час пусконаладжувальних робіт та базується на теплотехнічних характеристиках системи: ємності акумулятора, інерційності контурів, характеристиках клапанів і насосів. Оптимізоване регулювання забезпечує:

- стабільну роботу при всіх режимах навантаження;
- високу енергоефективність і зменшене енергоспоживання;
- комфортну температуру для споживачів;
- надійність та гнучкість функціонування системи.

Таким чином, система 2Н-ІТП не лише забезпечує високий рівень теплозабезпечення, а й має інтелектуальні алгоритми, що дозволяють адаптувати її роботу до змін у зовнішніх умовах і внутрішніх потребах об'єкта.

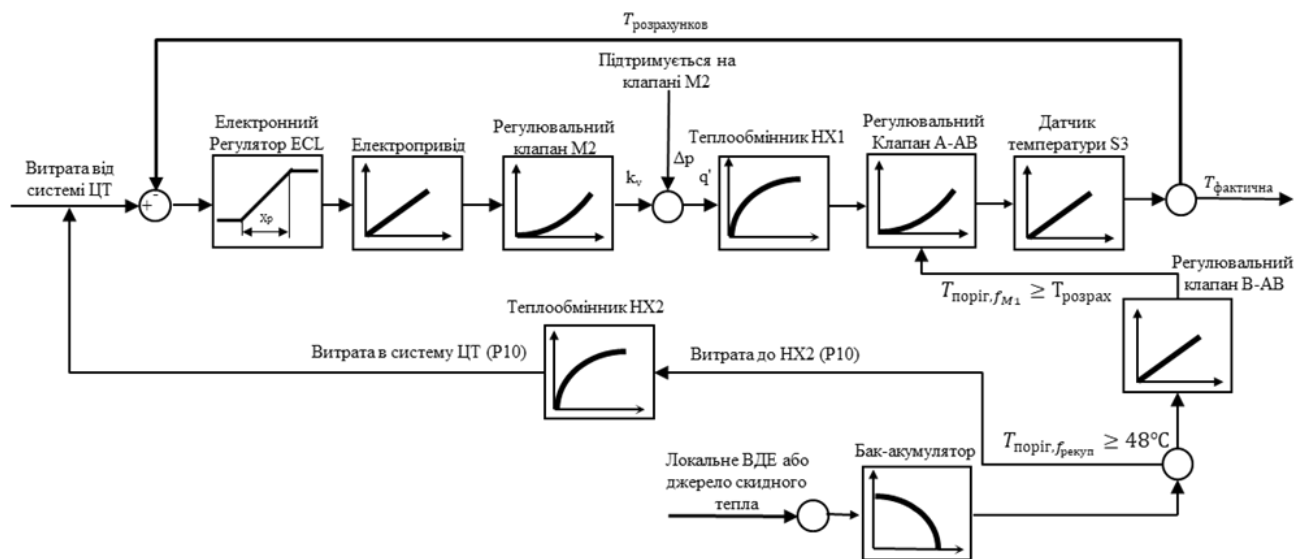
4.3 Функціональна схема

У контексті розвитку інтелектуальних систем ЦТ четвертого та п'ятого поколінь (4ПЦТ і 5ПЦТ), які передбачають двонаправлену взаємодію між джерелами та споживачами теплової енергії, особливого значення набувають ІТП з розширеним функціоналом і здатністю до адаптивного управління потоками енергії. Запропонована в межах цієї дисертаційної роботи концепція 2Н-ІТП передбачає гнучку роботу в кількох основних режимах: прийом теплової

енергії з централізованої мережі або від локального джерела, накопичення тепла в баку-акумуляторі та можливість передачі надлишкової енергії назад у мережу ЦТ у режимі рекуперації.

Для відображення логіки функціонування системи в усіх зазначених режимах розроблено єдину узагальнену функціональну схему (Рис. 4.6). Вона поєднує в собі елементи гідравлічної структури, алгоритмічну послідовність взаємодії компонентів та умови перемикавання між джерелами, що базуються на температурних та гідравлічних показниках.

Застосування такої уніфікованої функціональної схеми дозволяє формалізувати логіку регулювання, визначити критичні керовані параметри, а також забезпечити гнучке реагування системи на зміну зовнішніх умов або теплового навантаження. Цей підхід забезпечує цілісне бачення роботи 2Н-ІТП і формує основу для подальшої реалізації адаптивного керування в рамках інтелектуалізованих тепломереж нового покоління.



4.6 Функціональна схема 2Н-ІТП з погодозалежним регулюванням і рекуперацією тепла

Погодозалежне регулювання температури. Електронний регулятор у складі 2Н-ІТП керує системою опалення за заданим температурним графіком, враховуючи показники зовнішньої температури та температуру подачі у вторинному контурі. Зовнішній датчик відстежує температуру навколишнього середовища, а датчик S3 контролює температуру теплоносія на подачі системи опалення. На основі цих сигналів регулятор прогнозує необхідну температуру

подачі згідно з погодозалежною характеристикою та відповідно модулює подачу тепла до споживача. Такий підхід забезпечує динамічну зміну температури теплоносія у системі опалення залежно від погоди, підтримуючи комфорт у приміщеннях і підвищуючи енергоефективність.

Клапан M2 і підтримання перепаду тиску. Основним виконавчим елементом регулювання витрати від системи ЦТ є двоходовий клапан M2 із електроприводом з трипозиційним сигналом керування. Електропривод клапана M2 здійснює лінійне модулювання відкриття клапана у відповідь на сигнал регулятора – ступінь відкриття змінюється плавно, в разі коливань температури, що перевищують нейтральну зону, регулятор припиняє на заданий час подавати керуючий сигнал і очікує стабілізації роботи системи. Для забезпечення стабільної роботи регулюючого клапана на ньому підтримується постійний перепад тиску: у магістралі передбачено регулятор прямої дії, що автоматично тримає сталу різницю тисків на клапані M2. Завдяки цьому коливання тиску в мережі не впливають на витрату через теплообмінник первинного контуру, а регулювання температури здійснюється точно та без коливань. Крім того, витратна характеристика не зазнає змін під час роботи і знаходиться в межах, визначених виробником.

Витратні характеристики клапанів і теплообмінників. Для досягнення лінійної сукупної характеристики «клапан–теплообмінник» обирається належна витратна характеристика регулюючих клапанів. Зокрема, враховано, що теплообмінник первинного контуру (НХ1) має нелінійну залежність тепловіддачі від витрати теплоносія, протилежну до логарифмічної характеристики клапана. Тому клапан M2 доцільно обирати із логарифмічною витратною характеристикою, яка при зміні витрати компенсує властивості НХ1. За такого поєднання навіть невеликі зміни відкриття клапана при низьких витратах спричиняють пропорційно малі зміни теплового потоку, тоді як при високих витратах відкриття клапана впливає сильніше. В результаті сумарна передача тепла через теплообмінник стає близькою до лінійної залежно від положення клапана. Альтернативним варіантом є застосування лінійно-лінійної

характеристики, проте в умовах даної системи саме логарифмічна характеристика забезпечує кращу стабільність регулювання і рівномірність відгуку системи на зміни навантаження.

Локальне джерело тепла та триходовий клапан M1. Триходовий клапан M1 відіграє ключову роль у керуванні потоками теплоносія після бака-акумулятора, дозволяючи реалізувати логіку пріоритетного споживання накопиченої енергії від локального джерела та рекуперацію надлишків тепла в тепломережу. Принцип його дії базується на контрольованому перемиканні напрямку потоку залежно від температури у верхній зоні бака. У стандартному режимі, коли температура теплоносія в баку досягає розрахункової температури подачі (визначеної погодозалежним регулятором), потік спрямовується через порт В-АВ триходового клапана безпосередньо в систему опалення. Такий режим забезпечує ефективне використання локального джерела тепла для покриття внутрішніх потреб будівлі, мінімізуючи споживання з централізованої мережі. Коли ж температура перевищує встановлений граничний поріг (наприклад, 48 °C), активується режим рекуперації: автоматично включаються циркуляційні насоси, що забезпечують подачу надлишкового тепла через теплообмінник НХ2 у сторону мережі ЦТ. У цьому випадку одночасно реалізуються два потоки: частина теплоносія продовжує надходити до системи опалення через порт В-АВ, інша — спрямовується у тепломережу, віддаючи надлишок енергії. У разі відсутності потреби в теплі з боку системи опалення, порт В-АВ перекривається клапаном M1, а двоходовий клапан M2 продовжує перебувати в закритому положенні, повністю ізолюючи опалювальний контур від надходження теплоносія.

Попри те, що у багатьох випадках триходовий клапан має знижений авторитет через різницю гідравлічних режимів циркуляційних кілець, його вплив на стабільність та точність регулювання залишається важливим. При цьому, для забезпечення високої якості управління тепловими потоками, доцільним є застосування інтелектуальних інструментів регулювання — зокрема, адаптивного налаштування зони пропорційності та часу інтегрування

електронного регулятора. Це дозволяє компенсувати знижений авторитет регулювального клапана, досягти точнішого дотримання температурного графіка та зменшити похибку регулювання.

Таким чином, клапан М1 не лише виконує функцію перемикання між режимами, але й є критичним елементом управління в рамках інтегрованого контролю внутрішніх теплових потоків, що особливо важливо в умовах двонаправленої взаємодії між локальним джерелом та тепловою мережею.

4.4 Підсистеми автоматизації

Всі електричні підключення датчиків і виконавчих механізмів здійснюються в базовій частині електронного регулятора – на клемній панелі (Рис. 4.7). Конструктивно клемна панель поділена на секції для підключення слабкострумових (сигнальних) та силових ланцюгів, що забезпечує електробезпеку та розділення функцій між елементами управління і контролю. Такий підхід дозволяє забезпечити модульність, спростити монтажні роботи і зменшити ймовірність помилок під час інсталяції.

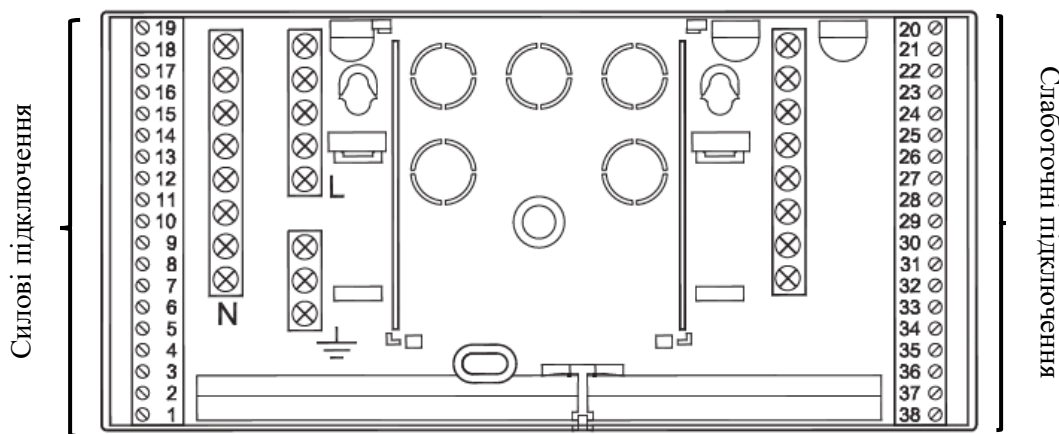


Рис. 4.7 Клемна панель електронного регулятора

У випадках реалізації складніших схем або за наявності розширеної кількості контрольованих змінних (температура, витрата, тиск, енергоспоживання тощо), доцільним є використання модулів розширення. Вони забезпечують додаткові входи/виходи для підключення додаткових датчиків, виконавчих пристроїв або витратомірів (Рис. 4.8). Такі модулі особливо

актуальні для 2Н-ІТП, що функціонують у динамічних режимах із кількома джерелами тепла або з можливістю рекуперації.

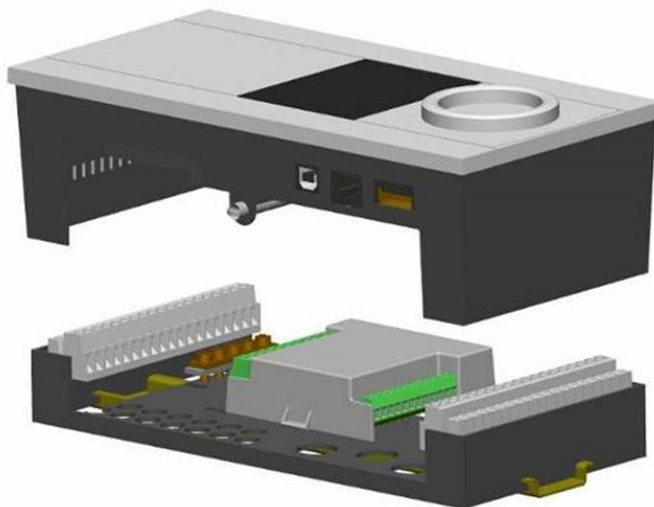


Рис. 4.8 Загальний вигляд електронного регулятора, клемної панелі та модуля розширення

Завдяки стандартизованій структурі підключень електронних регуляторів та модулів розширення забезпечується уніфіковане підключення та можливість швидкої адаптації системи до змін конфігурації – як у процесі впровадження, так і в подальшій експлуатації. У запропонованій схемі 2Н-ІТП усі підключення реалізовані згідно з інструкцією, що була розроблена після первинних тестів системи та супроводжує основне обладнання, що гарантує відповідність електромонтажу вимогам безпеки, сумісності та функціональної надійності.

Виконавчі механізми (насоси, клапани тощо) підключаються до відповідної секції клемної панелі, призначеної для силових ланцюгів (напруги 220 В змінного струму). На Рис. 4.9 показана схема підключення основних виконавчих механізмів. Зокрема, до системи включено переключаючий триходовий клапан В5, за допомогою якого здійснюється більш рівномірне завантаження бака-акумулятора. Ця функція не була реалізована в експериментальному стенді через малий об'єм бака. Передбачено можливість використання насоса Р4 для додаткового підведення теплової енергії від локального джерела до бака-акумулятора системи гарячого водопостачання (ГВП) у перспективі. Усі інші основні виконавчі механізми системи також задіяні – зокрема, клапани М1, М2 та насоси Р1, Р6.

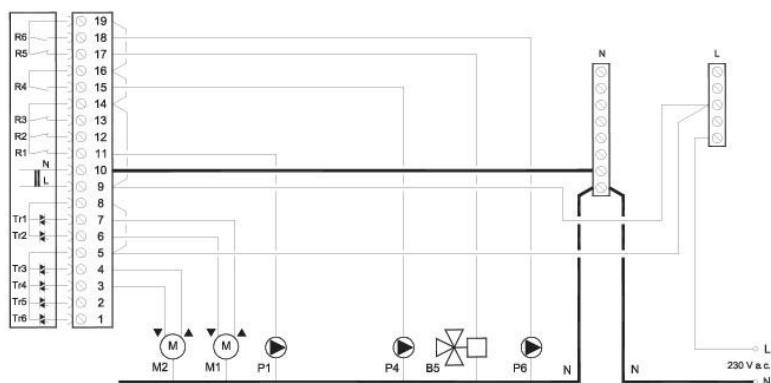


Рис. 4.9 Схема підключення виконавчих механізмів до клемної панелі

З метою розширення функціональних можливостей системи керування, окремі виконавчі механізми підключаються через виходи модуля розширення, що встановлюється на клемній панелі регулятора (Рис. 4.8). Зокрема, до такого модуля підключається циркуляційний насос P7 у разі, якщо локальне джерело тепла є гідравлічно відокремленим за допомогою теплообмінника від бака-акумулятора.

Крім того, через модуль реалізовано релейний вихід O1, який активує локальне джерело у випадку, коли температура в баку-акумуляторі не досягає розрахункового значення. У разі перевищення заданої температури для рекуперації, спрацьовує аварійний вихід, що забезпечує вмикання насосів P10 з метою передачі надлишкового тепла назад у мережу ЦТ.

Схема підключення зазначених виконавчих пристроїв через модуль розширення наведена на Рис.4.10. Така структура дає змогу реалізувати адаптивне керування тепловими потоками в режимах зарядження та розрядження бака-акумулятора, підвищуючи енергоефективність та стабільність функціонування 2Н-ІТП.

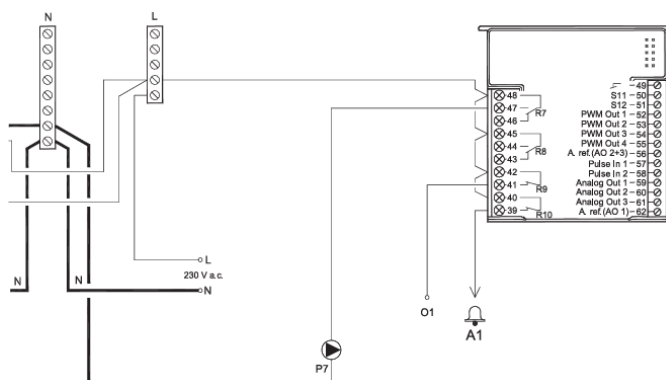


Рис. 4.10 Схема підключення виконавчих механізмів до модуля розширення

Циркуляційні насоси P6 та P7, що відповідають за циркуляцію теплоносія між локальним джерелом тепла та теплообмінником (у разі гідравлічного розділення), а також за заряд бака-акумулятора, можуть керуватись електронним регулятором через спеціалізовані керуючі виходи. У базовому варіанті для цього використовуються релейні виходи типу ON/OFF. Водночас, у розширених конфігураціях можливе застосування більш гнучких методів керування, зокрема широтно-імпульсної модуляції (PWM, Pulse-Width Modulation). Такий принцип забезпечує ефективне регулювання швидкості обертання насосів у відповідь на зміну теплових навантажень або внутрішніх станів системи. Приклад реалізації цього підключення наведено на Рис. 4.11.

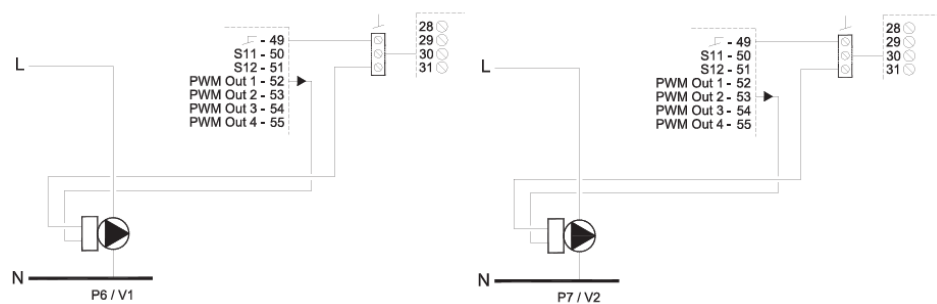


Рис. 4.11 Використання PWM для керування циркуляційними насосами від локального джерела та завантаження баку-акумулятору

У разі використання насосного обладнання, що не підтримує PWM-керування, або за необхідності реалізації іншого типу плавного регулювання, можливе застосування аналогового керуючого сигналу 0–10 В (Рис. 4.11). Такий сигнал забезпечує високу сумісність з насосами, що мають частотне чи аналогове керування, і дозволяє інтегрувати локальні джерела тепла незалежно від специфіки їх електроніки.

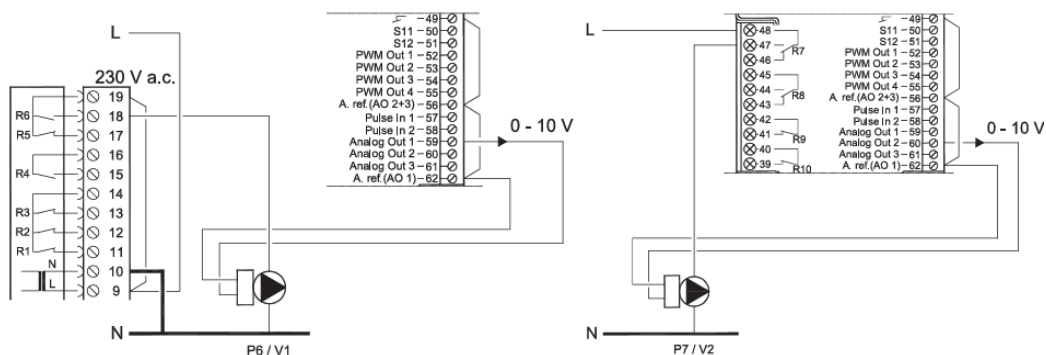


Рис. 4.12 Використання керуючого сигналу 0-10 В для керування циркуляційними насосами від локального джерела та завантаження баку-акумулятору

Підтримка декількох методів керування циркуляційними насосами суттєво розширює функціональні можливості системи 2Н-ІТП, підвищує її адаптивність до різних технічних умов і забезпечує просту інтеграцію з широким спектром обладнання. Це, у свою чергу, сприяє підвищенню енергоефективності, спрощує етапи модернізації та створює передумови для масштабування систем в межах розвитку інтелектуальних мереж ЦТ нового покоління.

Слаботочні підключення. До системи автоматизації 2Н-ІТП підключається широкий спектр слаботочних пристроїв — зокрема, датчики температури та тиску, що є ключовими для реалізації погодозалежного регулювання, моніторингу стану теплоносія та забезпечення умовної безпеки. Основна частина цих датчиків під'єднується до клемної панелі електронного регулятора, яка виконує функцію базового інтерфейсу для підключення сигналів та відіграє центральну роль у побудові системи збору даних (рис. 4.13).

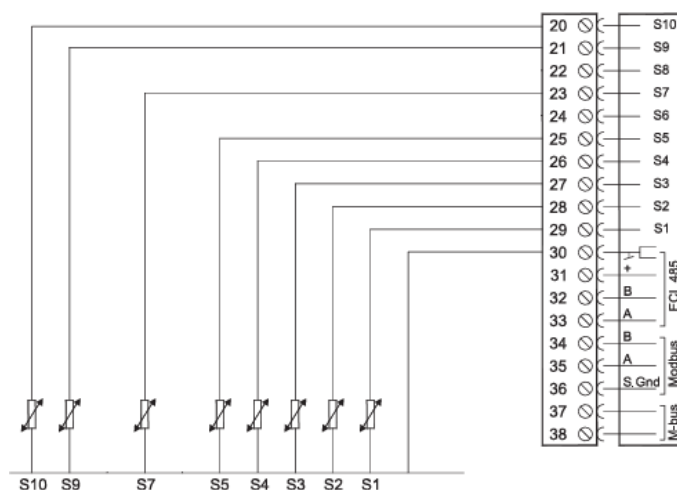


Рис.4.13 Схема підключення датчиків температури до клемної панелі

У випадках, коли кількість необхідних датчиків перевищує стандартну конфігурацію електронного регулятора, використовуються модулі розширення, що дозволяють інтегрувати додаткові сигнальні входи. До таких модулів, зокрема, підключаються датчики температури бака-акумулятора, які забезпечують вимірювання температури в різних зонах баку з метою реалізації режимів акумулювання та рекуперації. За потреби модуль може бути розширений іншими температурними чи тисковими датчиками для поглибленого контролю (рис. 4.14).

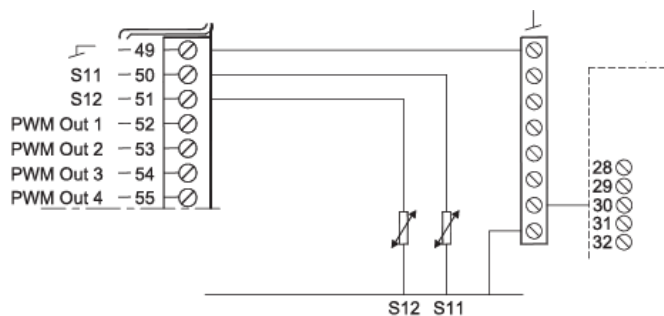
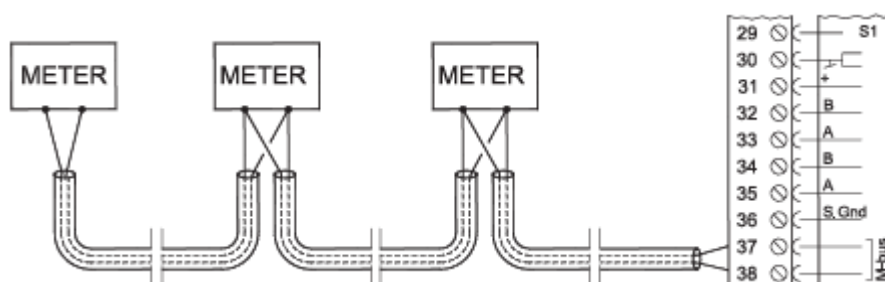


Рис.4.14 Схема підключення датчиків температури до модулю розширення

Крім того, до електронного регулятора через шину M-Bus підключаються лічильники теплової енергії, які забезпечують зчитування значень витрати теплоносія, температурного перепаду та обчисленої теплової потужності в реальному часі. Ці дані можуть бути використані не лише для енергетичного обліку, а й для додаткових функцій автоматизації, зокрема: обмеження пікового теплового навантаження, оцінки теплового балансу системи, виявлення аномалій у роботі насосного або регулюючого обладнання (рис. 4.15).



Таким чином, підсистеми автоматизації 2Н-ІТП забезпечують повноцінну інтеграцію датчиків, виконавчих механізмів та лічильників у єдину керовану структуру. Електричні підключення реалізовані через клемну панель та модулі розширення, що дозволяє масштабувати систему відповідно до складності об'єкта. Завдяки підтримці різних типів сигналів керування (релейних, ШІМ, аналогових 0–10 В) забезпечується висока сумісність з широким спектром обладнання. Інтеграція лічильників по шині M-Bus створює умови для енергетичного моніторингу та адаптивного керування. Сукупність цих рішень формує технічну основу для реалізації гнучкої та інтелектуалізованої тепlopостачальної системи на базі 2Н-ІТП.

4.5 Техніко-економічні показники

Оцінка техніко-економічної ефективності 2Н-ІТП є важливим етапом у підтвердженні доцільності впровадження сучасних рішень у системах ЦТ. У цьому розділі розглядаються енергетичні та економічні показники 2Н-ІТП потужністю 85 кВт, що працює з тепловими насосами як локальним джерелом тепла і забезпечує повернення надлишкової енергії до тепломережі.

Аналіз базується на даних експериментального стенду потужністю 0,98 кВт, у якому роль теплового насоса виконував електрокотел з ефективністю 96 %. Масштабування до реальної системи здійснено методом пропорційної інтерполяції. Для теплових насосів прийнято сезонний коефіцієнт ефективності $SCOP = 3,3$. Розрахунковий період — 720 годин (березень 2025 року).

Загальна вартість обладнання становить 48 955,88 євро, з яких 14 337 євро — тепловий пункт, 34 618,88 євро — теплові насоси (зовнішній блок теплового насосу HPC160VSX (4 блоки по 16 кВт) та внутрішній блок теплового насосу HPMT220-320M). За курсом 44 грн/євро загальні інвестиції становлять 2 154 058,72 грн.

Метою цього розділу є визначення ключових технічних параметрів системи, обчислення витрат на енергоносії, розрахунок економії порівняно з традиційною схемою теплозабезпечення, а також оцінка інвестиційної ефективності проекту за показниками терміну окупності (Payback Period), чистої поточної вартості (NPV) та індексу прибутковості (PI).

Технічні характеристики системи. Для реалізації функціональності 2Н-ІТП потужністю 85 кВт було обрано наступні основні компоненти: повітряний тепловий насос типу «повітря-вода» Mitsubishi HPC160VSX та модульний тепловий пункт Danfoss DSA HRU (модель DSA HRU 2 HE 85 CO2 100 S).

Тепловий насос Mitsubishi HPC160VSX призначений для зовнішньої установки, працює в режимі «повітря-вода» та забезпечує високі сезонні показники ефективності. Основні характеристики:

- Тип охолодження компресора: ротаційний;
- Номінальна теплова потужність (при $T=7\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\Delta T=5\text{ K}$): 16,0–27,6 кВт;

- Електрична потужність при $T = -7\text{ }^{\circ}\text{C}$: 5,0–6,0 кВт;
- SCOP (для T под. $35\text{ }^{\circ}\text{C}$): 3,89;
- Температурний діапазон роботи по теплоносію: від $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+43\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- Максимальний струм: 20 А;
- Електричне живлення: 3~400 В, 50 Гц;
- Рівень шуму (зовнішній блок): до 61 дБ(А);
- Холодоагент: R32;
- Об'єм холодоагенту: 5,6 кг;
- Витрата повітря: 1400 м³/год.

Модель обладнана інверторним компресором, електронним розширювальним клапаном, повітряним теплообмінником з антикорозійним покриттям та інтелектуальним управлінням режимами нагріву та відтаювання. Зазначена модель ефективна при експлуатації в регіонах з температурою зовнішнього повітря до $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Тепловий пункт Danfoss DSA HRU (двобаківий варіант). У якості центрального вузла розподілу і регенерації тепла використано заводський тепловий пункт Danfoss DSA HRU, який призначений для теплоспоживачів з функцією рекуперації надлишкової теплової енергії в систему ЦТ.

Ключові характеристики:

- Номінальна теплова потужність: 85 кВт;
- Тип теплообмінника (2шт.): паяний пластинчастий (X87H-1-26), нержавіюча сталь AISI 1.4404;
- Кількість баків-акумуляторів: 2 шт;
- Об'єм баків: 2×500 л;
- Максимальна температура теплоносія: $90\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- Робочий тиск (первинна сторона): до 10 бар;
- Робочий тиск (вторинна сторона): до 6 бар;
- Контролер: ECL Comfort 310 (версія PS10L.12);
- Циркуляційні насоси: Grundfos UPM GEO 25-85 180 PWM-C;
- Датчики та клапани: інтегровані, підтримка протоколу Modbus;

- Функція рекуперації та продажу тепла: наявна;
- Пікова потужність рекуперації (Heat Recover): до 100 кВт.

Конструкція забезпечує можливість підключення до теплових насосів та мережі ЦТ одночасно, дозволяючи автоматично перемикатись між режимами споживання, накопичення та передачі надлишкового тепла в залежності від теплових навантажень і температурних умов.

Параметри експериментального стенду та визначення базового теплового навантаження. Встановлена теплова потужність системи опалення становить 0,98 кВт, яка відповідає номінальному навантаженню об'єкта при розрахунковій зовнішній температурі -22°C .

У складі стенду:

- ЦТ – обмежене потужністю 0,98 кВт;
- Електричний котел потужністю 0,744 кВт, який імітує роботу теплового насоса;
- Локальне джерело тепла (електрокотел) покриває до 76 % потреб при сприятливих умовах;
- Теплообмінник НХ2 розрахований на номінальну потужність локального джерела;
- Насоси та електронний регулятор споживали в середньому 51 Вт на годину (всього 36,65 кВт·год за період).

Експеримент тривав з 01.03.2025 12:15:00 до 31.03.2025 12:00:00 (720 год).

Упродовж цього періоду:

- Локальне джерело згенерувало 307 кВт·год тепла;
- Надлишок тепла, поданий у мережу – 188 кВт·год;
- Теплова енергія, отримана з ЦТ – 167 кВт·год;
- Сумарне споживання системою – 286 кВт·год (без терморегулювання);
- У разі відсутності ІТП, очікуване теплове споживання склало б 392,7 кВт·год;

- Електричний котел працював згідно з графіком (11 годин на добу), витративши 319,28 кВт·год електроенергії.

Визначення базового теплового навантаження. Для оцінки базового навантаження системи опалення за відсутності ІТП було використано температурну модель, що враховує фактичну температуру зовнішнього повітря ($t_{\text{зовн}}$) з кроком 15 хвилин. Розрахунок добового навантаження виконується за формулою:

$$Q_{\text{доб}}(t_{\text{зовн}}) = Q_{\text{ном}} \cdot \frac{t_{\text{вн}} - t_{\text{зовн}}}{t_{\text{вн}} - t_{\text{розр}}} \quad [4.1]$$

де:

$Q_{\text{ном}}$ — номінальне теплове навантаження при $t_{\text{розр}} = -22^{\circ}\text{C}$ (для стенду $Q_{\text{ном}} = 0,98$ кВт);

$t_{\text{вн}}$ — температура всередині приміщення (20°C);

$t_{\text{зовн}}$ — температура зовнішнього повітря, що реєструвалася кожні 15 хвилин.

Ця модель дозволяє отримати теоретичне теплове навантаження на систему опалення за кожен момент часу, що в подальшому використовується для розрахунку загального теплового споживання у випадку відсутності погодозалежного регулювання або впровадження ІТП.

Енергетичні розрахунки. Масштабовані дані для системи 85 кВт отримано на основі експериментальних спостережень за наступною логікою:

- загальне споживання теплової енергії без ІТП становило 392,7 кВт·год (для 0,98 кВт);
- з ІТП – 286 кВт·год, що відповідає економії 27 %.

Для системи 85 кВт ці значення масштабуються за формулою:

$$Q_{85} = Q_{0,98} \cdot \left(\frac{85}{0,98} \right) \approx Q_{0,98} \cdot 86,7 \quad [4.2]$$

Таблиця 4.1 – Енергетичний баланс для системи з 2Н-ІТП (масштабовано на 85 кВт)

Показник	Значення (85 кВт)
Споживання тепла без ІТП	34 046,94 кВт·год
Споживання тепла з ІТП	24 816,33 кВт·год
Згенероване локальне тепло (ТН)	26 627,55 кВт·год

Надлишок, поданий у мережу	16 242,81 кВт·год (61 %)
Тепло, отримане з ЦТ	8 742,41 кВт·год
Споживання електроенергії ТН	8 071,98 кВт·год
Споживання електроенергії насосів і автоматики	333 кВт·год

Вартість енергоспоживання. Для оцінки експлуатаційних витрат було прийнято:

- тариф на теплову енергію – 3,545 грн/кВт·год (з ПДВ);
- тариф на електроенергію – 3,89 грн/кВт·год (без ПДВ), або 4,668 грн/кВт·год (з ПДВ).

Таблиця 4.2 – Розрахунок експлуатаційних витрат для 2Н-ІТП (за тарифами на тепло і електроенергію)

Компонент	Обсяг, кВт·год	Вартість, грн
Тепло з ЦТ	8 742,41	30 991,84
Електроенергія ТН	8 071,98	37 680,12
Електроенергія насосів/автоматики	333	1 554,44
Сумарні витрати	–	70 226,40
Дохід від надлишку тепла	16 242,81	–57 580,76
Чисті витрати	–	12 645,64

Для порівняння, традиційна система без ІТП при споживанні 34 046,94 кВт·год тепла має витрати:

$$34\,046,94 \cdot 3,545 = 120\,696,40 \text{ грн}$$

Урахування сезонної нерівномірності для оцінки економічної ефективності. Оскільки розрахунки енергоспоживання та економії базуються на даних за березень (відносно теплий місяць опалювального сезону), постає необхідність у введенні коригувального коефіцієнта сезонної нерівномірності для забезпечення більш об'єктивної оцінки техніко-економічної ефективності системи протягом усього опалювального періоду.

Сезонна нерівномірність зумовлена такими чинниками:

- зниженням середньої температури зовнішнього повітря у грудні–січні, що призводить до підвищення теплового навантаження на систему;
- зростанням частки споживання теплової енергії з ЦТ або локального джерела;
- зменшенням обсягу надлишкової теплової енергії, яку можна повернути в мережу в умовах холодної погоди (усе вироблене тепло йде на покриття потреб споживача).

На основі статистики кліматичних умов для України, а також аналізу характеру теплових навантажень:

- для споживання тепла системою опалення встановлено, що у холодні місяці (грудень–січень) теплове навантаження може бути в 1,3 раза вищим, ніж у березні. Враховуючи середньозважену оцінку для 6-місячного опалювального періоду, прийнято коефіцієнт $K_{\text{спож}} \approx 1,15$;
- для надлишку тепла, переданого в мережу, взято до уваги, що в холодні місяці обсяг рекуперації знижується. У січні–лютому він може бути близьким до нуля. Для коректного урахування цього ефекту прийнято коефіцієнт $K_{\text{надл}} \approx 0,7 \dots 0,8$.

Для спрощення подальших розрахунків уведено інтегральний коефіцієнт сезонної нерівномірності $K_{\text{екв}}$, який враховує одночасно зміну обсягів теплового навантаження та можливості повернення надлишкової енергії.

За результатами аналізу, $K_{\text{екв}}$, прийнято рівним 0,9, що зменшує розрахункову економію в умовах типової сезонної динаміки та забезпечує консервативну оцінку окупності.

Економічна ефективність впровадження 2Н-ІТП визначалась на основі розрахунку щомісячної економії витрат, а також показників окупності, чистої приведеної вартості (NPV) та індексу прибутковості (PI).

1. Різниця між витратами в традиційній схемі без ІТП та витратами з 2Н-ІТП становить:

$$\text{Витрита}_{\text{міс}} = C_{\text{без ІТП}} - C_{\text{2Н-ІТП}} = 108\,050,76 \text{ грн} \quad [4.3]$$

2. Витрати за опалювальний сезон (6 місяців) становлять:

$$\text{Витрита}_{\text{сезон}} = \text{Витрита}_{\text{міс}} \cdot 6 = 648\,304,56 \text{ грн} \quad [4.4]$$

3. З огляду на зменшення частки надлишку тепла в холодні місяці, застосовано коефіцієнт корекції:

$$K_{\text{екв}} = 0,9$$

Тоді скоригована економія за сезон:

$$\text{Витрита}_{\text{скор}} = 648\,304,56 \cdot 0,9 = 583\,474,10 \text{ грн} \quad [4.5]$$

4. Окупність проєкту

$$T_{\text{окуп}} = \frac{\text{Інвестиції}}{\text{Витрита}_{\text{скор}}} = \frac{2154058,72}{583474,10} \approx 3,69 \text{ роки} \quad [4.6]$$

5. Чиста приведена вартість (NPV) за 10 років при ставці дисконту $r=10\%$

Ануїтетний коефіцієнт (PVIFA):

$$PVIFA = \frac{1-(1+r)^{-n}}{r} = \frac{1-(1+0,1)^{-10}}{0,1} = 6,1446 \quad [4.7]$$

Розрахунок NPV:

$$NPV = \text{Витрита}_{\text{скор}} \cdot PVIFA - \text{Інвестиції} = 1\,431\,156,26 \text{ грн} \quad [4.8]$$

6. Індекс прибутковості (PI)

$$PI = \frac{\text{Приведені грошові потоки}}{\text{Інвестиції}} = \frac{3\,585\,214,98}{2\,154\,058,72} \approx 1,66 \quad [4.9]$$

Таблиця 4.3 – Порівняння економічних показників: без ІТП, з традиційним ІТП, з 2Н-ІТП

Показник	Без ІТП	З традиційним ІТП	З 2Н-ІТП
Інвестиції, грн	0	630 828	2 154 058,72
Споживання тепла від ЦТ, кВт·год	34 046,94	24 816,33	8 742,41
Витрати на тепло, грн	120 696,40	87 973,65	30 991,84
Електроспоживання, кВт·год	0	333	8 404,98
Витрати на електроенергію, грн	0	1 554,44	39 234,56
Дохід від надлишку тепла, грн	0	0	-57 580,76
Чисті витрати, грн	120 696,40	89 528,09	12 645,64

Економія за місяць, грн	-	31 168,31	108 050,76
Скоригована економія за сезон, грн	-	168 308,87	583 474,10
Окупність, роки	-	3,38	3,69
NPV (10 років, 10 %), грн	-	1 147 868,40	1 431 156,26
PI	-	2,82	1,66

Проведений техніко-економічний аналіз підтвердив доцільність впровадження 2Н-ІТП з тепловим насосом. Модернізована теплова підстанція потужністю 85 кВт, що використовує теплові насоси як основне джерело тепла та забезпечує функцію продажу надлишкової енергії в теплову мережу, виявилася високоефективною як з енергетичної, так і з економічної точки зору.

У порівнянні з традиційною схемою, використання 2Н-ІТП дозволило скоротити споживання теплової енергії з боку системи ЦТ на 74%, що є наслідком ефективного використання теплових насосів з високим сезонним коефіцієнтом ефективності ($SCOP = 3,3$). Загальний тепловий попит будівлі, який без застосування ІТП становив би 34 046,94 кВт·год, зменшився до 24 816,33 кВт·год. Економія теплової енергії становила 9 230,61 кВт·год або приблизно 27%.

Суттєвою перевагою 2Н-ІТП є можливість функціонування у режимі теплового просьюмера — понад 61% згенерованої теплоти локальним джерелом (тепловим насосом) було передано назад у мережу ЦТ як надлишок. Це забезпечило формування додаткового доходу на рівні 57 580,76 грн лише за один місяць роботи в опалювальний період.

У фінансовому аспекті система з 2Н-ІТП показала суттєву перевагу над традиційною схемою. Загальні щомісячні експлуатаційні витрати становили лише 12 645,64 грн, у той час як теплоспоживання за класичним сценарієм (без ІТП) обійшлося б у 120 696,40 грн. Таким чином, щомісячна економія склала 108 050,76 грн, а з урахуванням сезонного коефіцієнта нерівномірності (0,9), скоригована економія за опалювальний сезон становить 583 474,10 грн.

Інвестиційні витрати на впровадження 2Н-ІТП становили 2 154 058,72 грн. Розрахований термін окупності становить 3,69 роки, що відповідає прийнятним критеріям для муніципальних або комерційних проєктів з підвищення енергоефективності. Крім того, при розрахунковому горизонті у 10 років та ставці дисконту 10%, чиста приведена вартість (NPV) становить 1 431 156,26 грн, а індекс прибутковості (PI) дорівнює 1,66, що підтверджує інвестиційну привабливість рішення.

Таким чином, 2Н-ІТП із функцією рекуперації тепла та частковою генерацією від локального джерела демонструє високу техніко-економічну ефективність. Запропонована система може бути рекомендована до широкого впровадження в рамках модернізації мереж 4-го та 5-го поколінь ЦТ.

4.6 Оцінка впливу на систему централізованого теплопостачання та рекомендації щодо впровадження

Вплив 2Н-ІТП на системи ЦТ. Використання 2Н-ІТП змінює традиційну парадигму систем ЦТ, надаючи можливість будівлям не лише отримувати тепло з мережі, а й повертати надлишкову енергію у систему. Це відкриває нові горизонти для балансування теплових потоків у міських мережах, особливо в умовах інтеграції ВДЕ. За рахунок інжекції надлишкового тепла, згенерованого локальними системами, такими як теплові насоси, сонячні колектори чи когенераційні установки, зменшується навантаження на централізовані джерела тепла, особливо в години пікового споживання. Наприклад, у скандинавських країнах теплові просюмери змогли досягати надлишкової генерації, яка перевищує власні потреби у теплі на 50–120 %, тоді як в окремих містах підключення таких споживачів дозволило знизити навантаження на великі джерела до 25 % [77].

Таке вирівнювання добового та сезонного навантаження дає змогу ефективніше планувати використання генеруючих потужностей, зменшити частку резервного або пікового навантаження та підвищити ефективність мережевої генерації. Водночас, впровадження 2Н-ІТП висуває нові технічні

вимоги до гідравлічного та температурного регулювання. В умовах реверсивного потоку теплоносія необхідно не лише стабілізувати перепад тиску для забезпечення нормального функціонування мережі, а й компенсувати гідравлічний опір при передачі надлишку тепла в розподільчу мережу. Це потребує застосування додаткових насосів або змін у схемі керування витратами.

Особливу увагу слід приділити впливу двонаправлених режимів на загальну гідравліку мережі. Стандартні ІТП передбачають односторонній рух теплоносія із стабільним перепадом тиску на регулювальних клапанах. Натомість 2Н-ІТП працюють у режимах із змінними напрямками потоку, що ускладнює розрахунок гідравлічного опору та вимагає детального підбору насосного обладнання. Наприклад, у випадках передачі тепла до мережі з нижчого температурного рівня, як це типово для ВДЕ-джерел, потрібно врахувати додаткові втрати напору, а також забезпечити збереження гідравлічного балансу між сусідніми вузлами системи. Вибір циркуляційних насосів має враховувати не лише теплове навантаження, але й спроможність долати змінний гідравлічний опір у реверсивному режимі, що вимагає гнучкості налаштувань, інверторного керування та забезпечення стабільності при переході між режимами споживання й передачі надлишків.

З технічної точки зору, система управління повинна забезпечити динамічне балансування між подачею й зворотним контуром, з урахуванням можливих температурних коливань та непередбачуваних змін у тепловому навантаженні. Оскільки традиційні централізовані мережі проектуються для роботи з високим температурним перепадом, прийом тепла з низькотемпературних джерел створює виклики щодо температурної стабільності у подаючій лінії. З цією метою можуть використовуватись буферні ємності, що дозволяють вирівняти температурні показники перед передачею надлишків теплоти в мережу та уникнути негативного впливу на споживачів. Адаптація алгоритмів керування — ще один важливий напрямок, оскільки необхідно

враховувати не лише локальні потреби, а й загальний стан мережі, що динамічно змінюється.

Окремої уваги заслуговує потенціал 2Н-ІТП як інструменту інтеграції розподілених ВДЕ у системи ЦТ. Сучасні теплові пункти здатні працювати у симбіозі з сонячними колекторами, геотермальними тепловими насосами або системами утилізації тепла, що генерується у процесах кондиціонування, охолодження або обробки даних. Згідно з результатами пілотних проєктів, інтеграція сонячних колекторів у локальні мережі дозволяє суттєво підвищити частку відновлюваного тепла в загальному енергетичному балансі — подекуди до 100 % збільшення їхнього внеску. У підсумку, частина споживачів може не лише покривати власні потреби у теплі, а й передавати надлишок у мережу, підвищуючи рівень децентралізації системи та зменшуючи залежність від викопного палива.

Внаслідок цього система ЦТ набуває характеристик гнучкої енергосистеми, де кожен тепловий пункт може виступати як споживач і виробник тепла. Це підвищує загальну стійкість мережі до пікових навантажень і дозволяє краще реагувати на зміну кліматичних, економічних та технічних умов. У майбутньому саме такі архітектури, які дозволяють двонаправлений обмін енергією, можуть стати основою розумного та сталого теплопостачання у містах, з інтегрованими ВДЕ, активними користувачами і цифровими системами управління.

Бар'єри впровадження 2Н-ІТП. Попри високий потенціал 2Н-ІТП у підвищенні ефективності теплопостачання, їх широкомасштабне впровадження стикається з низкою бар'єрів — технічних, регуляторних, ринкових та інституційних.

Технічні обмеження передусім пов'язані з архітектурою існуючих централізованих тепломереж, які переважно проєктувалися для одностороннього потоку теплоносія. Більшість інфраструктури не пристосована до прийому тепла з боку споживача. Для впровадження двонаправлених режимів потрібна модернізація гідравлічних схем, зокрема впровадження насосного обладнання з

інверторним керуванням, здатного працювати як на подачу, так і на передачу енергії в зворотному напрямку. Крім того, необхідне забезпечення точного балансування тисків між магістралями, що потребує застосування додаткових регуляторів, перепускних клапанів і гнучких схем керування. Гідравлічні опори при передачі надлишку енергії вимагають точного підбору насосів із врахуванням змінного напору та температурних перепадів.

Ще одним *технічним викликом* є невідповідність температурних режимів. Централізовані мережі традиційно працюють за принципом високої температури подачі й низької температури зворотки для мінімізації витрат і забезпечення стабільної роботи джерел тепла. Натомість тепло, яке генерується локальними джерелами (сонячні колектори, теплові насоси тощо), часто має нижчі температури. Передача надлишку в мережу без попередньої адаптації може спричинити зниження температури подачі на інших ділянках мережі, порушення температурного графіка та нестабільність теплопостачання до кінцевих споживачів. Для вирішення цієї проблеми потрібна інтеграція буферних ємностей, попереднє підняття температури, локальне змішування теплоносія або адаптивне керування, що відповідає поточним умовам експлуатації.

Регуляторні бар'єри полягають у відсутності нормативної бази, яка б визначала правила роботи теплових просюмерів. У багатьох країнах, зокрема в Україні, чинне законодавство орієнтоване переважно на односторонню модель теплопостачання, де постачальник єдиний, а споживач — пасивний. Правові механізми зворотної подачі тепла, його обліку, тарифоутворення та якості теплоносія залишаються нерегламентованими. На відміну від сектору електроенергетики, де діють механізми «зелених» тарифів або net-metering, у сфері ЦТ такі інструменти практично відсутні. Це створює ситуацію невизначеності як для операторів тепломереж, так і для потенційних інвесторів у 2Н-ІТП. У європейській практиці фіксуються подібні проблеми — наприклад, у скандинавських країнах, попри загальне прагнення до децентралізації та

інтеграції ВДЕ, бракує уніфікованих контрактних моделей для теплових просюмерів, що ускладнює укладення угод із постачальниками теплової енергії.

Ринкові бар'єри також мають системний характер. На сьогодні відсутній механізм, який дозволяв би об'єктивно оцінювати вартість надлишкової теплоти, згенерованої споживачем, і здійснювати її комерціалізацію. Питання визначення ціни, компенсації витрат на інфраструктуру, відповідальності за параметри теплоносія та балансування залишаються неврегульованими. Крім того, ринок теплової енергії часто є монопольним або ж сильно зарегульованим, що не сприяє створенню умов для peer-to-peer торгівлі чи реалізації надлишку тепла через відкриті платформи. Відсутність незалежних теплових операторів і прозорих ринкових механізмів знижує мотивацію до впровадження двонаправлених систем на локальному рівні.

У інституційному вимірі перешкодою є відсутність чітко визначених зон відповідальності між учасниками системи — оператором мережі, джерелом тепла та кінцевим споживачем. У випадку двонаправленої подачі тепла ці ролі можуть змінюватися в часі, що створює додаткову складність в управлінні та контролі параметрів системи. Необхідне оновлення принципів енергетичного менеджменту, нові регламентні документи та стандарти взаємодії в межах учасників ринку ЦТ.

Загалом, подолання зазначених бар'єрів потребує комплексного підходу, який охоплює модернізацію інфраструктури, адаптацію законодавства, запровадження стимулюючих тарифів та створення ринку надлишкового тепла. Водночас саме вирішення цих проблем здатне надати суттєвий імпульс розвитку гнучких, сталих і низьковуглецевих систем ЦТ, де 2Н-ІТП виступають як ключова інфраструктурна одиниця майбутнього.

Рекомендації щодо впровадження та вдосконалення нормативно-правової бази. Ефективна інтеграція 2Н-ІТП у системи ЦТ потребує глибоких змін у національній нормативно-правовій базі. Передусім, необхідно визначити регламент взаємодії між операторами мережі та споживачами, які виступають одночасно і як виробники, і як споживачі теплової енергії. Такий розподіл

відповідальності має охоплювати технічні параметри теплоносія (температура, тиск, якість) при зворотному постачанні тепла у мережу, а також правила експлуатації обладнання на межі балансової належності.

Ключовим аспектом має стати впровадження механізмів фінансового стимулювання для об'єктів, що відпускають тепло у систему. Зокрема, необхідно розробити спеціалізовані тарифні моделі, які враховуватимуть внесок просюмерів у балансування системи та зниження навантаження на центральні джерела. Це можуть бути зворотні тарифи (аналог «зелених» для електроенергії) або компенсаційні виплати за відпущену теплову енергію, розраховані на базі її вартості в пікові періоди або економії на виробництві. Також доцільним є застосування податкових пільг або програм співфінансування для покриття інвестицій у двонаправлену інфраструктуру, зокрема ІТП з функцією передачі надлишку тепла.

Важливим напрямком розвитку є створення умов для формування ринку надлишкової теплової енергії. Такий ринок передбачає укладання прямих угод купівлі-продажу теплової енергії між споживачами та просюмерами, що створює гнучке середовище для оптимізації локальних теплових потоків. Запровадження цифрових платформ для обміну даними між учасниками системи та автоматичного балансування попиту і пропозиції сприятиме розвитку децентралізованих рішень у теплопостачанні.

З технічного боку, необхідно на законодавчому рівні закріпити вимоги до готовності ІТП до інтеграції у цифрові мережі. Зокрема, регламентація повинна передбачати обов'язкову наявність інтерфейсів для дистанційного моніторингу, підтримку протоколів зв'язку (наприклад, M-Bus, BACnet, Modbus), сумісність з SCADA-системами, а також можливість обміну параметрами в реальному часі з диспетчерськими центрами. Це є особливо актуальним у контексті зростання ролі цифровізації в секторі теплопостачання та переходу до Smart ЦТ-систем.

Україна може орієнтуватися на європейські підходи до розвитку ринку теплової енергії, де дедалі більше уваги приділяється інтеграції ВДЕ у системи ЦТ, використанню стандартів EN/CEN, а також створенню регуляторних

«пісочниць» для випробування інноваційних технологій. Актуальним є також включення положень щодо двонаправленого теплопостачання в стратегічні документи енергетичної політики, такі як Національний план з енергоефективності, дорожні карти декарбонізації теплового сектору, а також адаптація Закону «Про теплопостачання» з урахуванням нових функцій просюмерів.

Крім того, для зменшення ризиків інвесторів і просюмерів доцільно встановити технічні вимоги до якості зворотного теплоносія та забезпечити прозору процедуру приєднання об'єктів генерації до мережі. Це дозволить гарантувати справедливі умови гри на ринку та сприятиме зростанню довіри між споживачами і операторами системи.

Отже, гармонізація нормативно-правової бази, впровадження гнучких тарифних механізмів, розвиток цифрових платформ обліку та створення ринку надлишкової теплової енергії є ключовими умовами успішного впровадження 2Н-ІТП в Україні. Такі кроки не лише сприятимуть підвищенню енергоефективності системи ЦТ, але й відкриють шлях до глибшої інтеграції ВДЕ та активного залучення кінцевих споживачів до формування енергетичного ландшафту.

Напрями подальших досліджень. У подальших дослідженнях у сфері 2Н-ІТП доцільно зосередити увагу на чотирьох ключових напрямках: технічному вдосконаленні, енергетичному моделюванні, розвитку ринкових моделей та інтеграції з європейськими практиками.

Першочергово потребують розвитку технічні рішення, які забезпечують надійну та гнучку роботу 2Н-ІТП в умовах змінного теплового навантаження та двостороннього потоку теплоносія. До таких рішень належать оновлені схеми підключення з використанням теплових акумуляторів, які дозволяють згладжувати пікові навантаження, а також вдосконалені алгоритми керування насосами та клапанами, що враховують як споживання, так і передачу надлишку тепла. Особливу увагу слід приділити адаптивному регулюванню при низькотемпературних режимах та впровадженню гнучких конфігурацій

відповідно до концепції 5ПЦТХ– мереж із децентралізованим і багаторівневим теплопостачанням.

Другий напрям пов'язаний із моделюванням та цифровою трансформацією теплових мереж. Розробка цифрових двійників ІТП та ділянок ЦТ-мереж із активними вузлами дозволить відпрацьовувати стратегії управління та оптимізації режимів у віртуальному середовищі. Використання мов моделювання, таких як Modelica чи Python (наприклад, бібліотеки Dymola, ThermoPower, або пакетів для симуляції у MATLAB/Simulink), відкриває можливості для імітації складних сценаріїв з урахуванням поведінки просюмерів, локальних джерел енергії та змін кліматичних умов. Важливим завданням є інтеграція таких моделей із SCADA-платформами для підтримки оперативного управління на основі прогнозів і аналітики реального часу.

Третій вектор досліджень охоплює економічну та ринкову складову. Необхідно глибше вивчити потенційні бізнес-моделі функціонування 2Н-ІТП, включаючи теплові кооперативи, агрегаторів теплових навантажень і peer-to-peer обмін енергією. Аналіз впливу різних тарифних політик, сценаріїв компенсацій за подане тепло та рівнів інвестиційної підтримки дозволить розробити фінансово життєздатні підходи до масштабного впровадження. Окремо слід дослідити сценарії розвитку локального ринку надлишкової теплової енергії та створення механізмів ціноутворення, які б враховували внесок просюмерів у зниження пікових навантажень та стабілізацію системи.

Четвертий напрям пов'язаний із гармонізацією української практики з європейськими тенденціями. Актуальними залишаються дослідження щодо адаптації європейських стандартів EN/CEN з енергоефективності тепломереж, інтеграції ВДЕ та смарт-обліку. Рекомендації технічного комітету CEN/TC 107, а також результати пілотних проєктів, таких як RELaTED, STORM або LIFE SET HEAT, демонструють важливість поетапного переходу до низькотемпературних мереж і цифрового управління. Подальше вивчення цих підходів, особливо в контексті міських агломерацій, дозволить створити методичну основу для

розробки державних стандартів, галузевих керівництв та дорожніх карт для децентралізованого теплопостачання.

У перспективі всі ці напрями повинні інтегруватися у спільну стратегію трансформації систем ЦТ, орієнтовану на декарбонізацію, енергоефективність, гнучкість та активну участь споживача. Дослідження, спрямовані на валідацію таких концепцій у лабораторних і польових умовах, можуть стати каталізатором швидшого переходу до сучасних форматів теплопостачання в Україні.

4.7 Висновки

Методика інженерних розрахунків 2Н-ІТП, викладена в цьому розділі, забезпечує комплексне охоплення конструктивних, алгоритмічних та прикладних аспектів функціонування системи. На основі проведеного аналізу сформульовано висновки щодо її енергоефективності, технологічної надійності та доцільності впровадження в інфраструктуру сучасного ЦТ.

У рамках розділу розроблено та детально описано алгоритмічні схеми роботи 2Н-ІТП, які охоплюють три основні режими функціонування: теплопостачання від ЦТ, комбінований або автономний режим роботи з використанням локального джерела тепла (наприклад, теплового насоса чи іншого ВДЕ), а також режим рекуперації надлишкової теплової енергії з можливістю її передачі назад у мережу ЦТ. Ці алгоритми, представлені у вигляді структурованих блок-схем, формалізують логіку керування ключовими елементами системи, такими як циркуляційні насоси, регулювальні клапани тощо. Вони забезпечують адаптивне перемикання між режимами залежно від змінних умов, таких як температура зовнішнього повітря, гідравлічні параметри та техніко-економічна доцільність. Особливо важливим є режим рекуперації, який дозволяє системі виконувати функцію теплового просьюмера, інтегруючись у сучасні інтелектуальні теплові мережі четвертого та п'ятого поколінь. Це сприяє підвищенню енергоефективності та гнучкості

теплостачання, дозволяючи не лише споживати тепло, але й повертати надлишкову енергію в мережу.

Теплотехнічні характеристики 2Н-ІТП ґрунтуються на використанні високоефективних компонентів, які забезпечують надійність і стабільність роботи системи. У конструкції застосовуються паяні пластинчасті теплообмінники Danfoss XB59M, виготовлені з нержавіючої сталі з мідним паянням, що забезпечують високий коефіцієнт теплопередачі при компактних розмірах. Регулювальні клапани VRB3 та AVQM з електроприводами дозволяють точно керувати потоками теплоносія, підтримуючи стабільну температуру в системі опалення. Енергоефективні циркуляційні насоси, такі як Wilo Stratos Maxo або Grundfos Magna 3, забезпечують адаптивне регулювання витрати залежно від теплового навантаження, що знижує електроспоживання та знос обладнання. Важливу роль відіграє буферний бак-акумулятор, який згладжує коливання теплових навантажень, компенсує нестабільність роботи локальних джерел тепла та захищає систему від пікових навантажень. Використання платинових датчиків температури Pt1000 з високою точністю ($\pm 0,3$ °C) забезпечує швидке реагування на зміни температури, що дозволяє підтримувати стабільні параметри в системі опалення. Гідравлічна незалежність контурів, досягнута завдяки теплообмінникам, захищає вторинний контур від коливань тиску в мережі ЦТ, підвищуючи безпеку та надійність роботи.

Система автоматизації 2Н-ІТП базується на електронному регуляторі ECL Comfort 310, який забезпечує погодозалежне регулювання температури, точне керування клапанами та насосами, а також моніторинг стану системи в реальному часі. Інтеграція слаботочних датчиків, теплових лічильників через шину M-Bus та підтримка різних методів керування насосами (релейні виходи, ШІМ, аналогові сигнали 0–10 В) забезпечують високу сумісність з різними типами обладнання та гнучкість у налаштуванні системи. Модульна структура підключень через клемну панель і модулі розширення спрощує монтаж, підвищує надійність електричних з'єднань і дозволяє масштабувати систему для

складніших конфігурацій. Такий підхід забезпечує адаптивність до змін умов експлуатації та можливість інтеграції з інтелектуальними тепловими мережами.

Техніко-економічний аналіз системи 2Н-ІТП потужністю 85 кВт, проведений на основі даних експериментального стенду, підтвердив її високу ефективність. Завдяки використанню теплового насоса з сезонним коефіцієнтом ефективності ($SCOP = 3,3$), споживання теплової енергії з мережі ЦТ скоротилося на 74% порівняно з традиційною схемою тепlopостачання. Загальний тепловий попит будівлі зменшився з 34 046,94 кВт·год до 24 816,33 кВт·год, що забезпечило економію 27%. Можливість рекуперації надлишкової теплової енергії дозволила передати 61% згенерованої локальним джерелом енергії назад у мережу ЦТ, що забезпечило додатковий дохід у розмірі 57 580,76 грн за місяць. Щомісячні експлуатаційні витрати системи склали лише 12 645,64 грн порівняно з 120 696,40 грн для системи без ІТП, що дало економію 108 050,76 грн на місяць. З урахуванням сезонної нерівномірності (коефіцієнт 0,9) економія за опалювальний сезон склала 583 474,10 грн. Інвестиційні витрати на впровадження системи (2 154 058,72 грн) окупаються за 3,69 роки, а чиста приведена вартість (NPV) за 10 років при ставці дисконту 10% становить 1 431 156,26 грн з індексом прибутковості (PI) 1,66, що свідчить про високу інвестиційну привабливість рішення.

Доповненням до представленої методики є аналіз системних аспектів впровадження 2Н-ІТП у сучасну інфраструктуру ЦТ. Зокрема, обґрунтовано вплив інженерної конфігурації таких теплових пунктів на тепловий і гідравлічний баланс мережі, а також виокремлено основні технічні виклики, пов'язані з інтеграцією розподілених джерел тепла. Виявлено бар'єри нормативного, ринкового та технічного характеру, які обмежують широке застосування двонаправлених підключень. З урахуванням цього розроблено рекомендації щодо адаптації законодавства, створення механізмів тарифного стимулювання і стандартів підключення, що є важливим з точки зору практичного застосування методики. Окрему увагу приділено перспективним напрямом подальших досліджень, спрямованих на вдосконалення інженерних

алгоритмів, моделювання гібридних режимів, розширення функцій цифрового управління та узгодження з європейськими стандартами енергоефективності. Таким чином, запропонована методика не лише формує основу для проєктування та техніко-економічної оцінки 2Н-ІТП, але й враховує контекст впровадження таких систем у сучасні розподілені тепломережі.

Запропонована концепція 2Н-ІТП відповідає сучасним вимогам до інтелектуальних теплових мереж четвертого та п'ятого поколінь, забезпечуючи двонаправлену взаємодію між джерелами та споживачами тепла. Перспективи розвитку системи включають впровадження прогностичного керування на основі метеорологічних даних, аналізу ефективності обладнання та енергетичних тарифів, а також інтеграцію з хмарними сервісами для моніторингу та оптимізації роботи. Таким чином, 2Н-ІТП є перспективним рішенням для модернізації систем тепlopостачання, сприяючи підвищенню енергоефективності, інтеграції ВДЕ та адаптивності до сучасних енергетичних викликів.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Дисертаційна робота присвячена розробці, дослідженню та впровадженню енергоефективних 2Н-ІТП у системи ЦТ, що є важливим кроком у модернізації енергетичних систем України. Дослідження відповідає глобальним тенденціям енергоефективності, декарбонізації, цифровізації та інтеграції ВДЕ, а також враховує виклики енергетичної безпеки України в умовах воєнного часу, коли децентралізація та стійкість енергетичних систем є критично важливими. На основі комплексного підходу, що поєднує теоретичний аналіз, математичне моделювання, експериментальні дослідження та прикладні розробки, отримано наступні ключові висновки:

Аналіз розвитку теплових пунктів та систем ЦТ. Проведено системний аналіз еволюції систем ЦТ від першого до четвертого покоління (4ПЦТ) з перспективою переходу до систем п'ятого покоління (5ПЦТХ), які інтегрують тепlopостачання та холодопостачання. Аналіз охопив історичний розвиток

теплових мереж, починаючи з парових систем першого покоління (1880-ті роки) до сучасних низькотемпературних мереж 4ПЦТ (температура теплоносія $\leq 50^{\circ}\text{C}$) і систем 5ПЦТХ, що використовують теплові насоси та сезонне накопичення енергії. Визначено, що сучасні теплові пункти відіграють ключову роль у трансформації енергетичних систем, забезпечуючи гнучке управління тепловими потоками, інтеграцію локальних джерел енергії (сонячні колектори, теплові насоси, скидне тепло від промислових процесів) та двонаправлену взаємодію між споживачами (просюмерами) і мережею. Досліджено світовий досвід (проекти RELaTED, STORM, DHC+ у Данії, Швеції та Німеччині), який підтверджує, що перехід до низькотемпературних мереж скорочує теплові втрати на 15–20% і підвищує частку ВДЕ до 50–80% у балансі теплопостачання. Відповідність вимогам Директиви ЄС 2023/1791 (щодо частки ВДЕ: 50% до 2027 р., 80% до 2035 р., 100% до 2050 р.) підкреслює актуальність дослідження для гармонізації з європейськими стандартами та підтримки енергетичної безпеки України.

Розробка схеми та моделі 2Н-ІТП. Запропоновано інноваційну схему 2Н-ІТП, яка забезпечує інтеграцію локальних джерел тепла (сонячні колектори, теплові насоси повітря-вода або вода-вода, скидне тепло від промислових і комерційних процесів тощо) з мережею ЦТ. Схема включає пластинчасті теплообмінники, бак-акумулятор для накопичення тепла, регулювальні клапани і циркуляційні насоси, що забезпечують адаптивне керування тепловими потоками. Розроблено фізико-математичну модель теплових потоків і тепломасообмінних процесів, яка враховує динамічні фактори: коливання теплового навантаження, погодні умови та продуктивність локальних джерел. Модель побудована в MATLAB і дозволяє прогнозувати теплові потоки з похибкою $\leq 5\%$, що підтверджує її точність. Вона демонструє ефективність 2Н-ІТП у трьох режимах: моновалентному (споживання тепла від мережі ЦТ), бівалентному (комбіноване використання мережі та локальних джерел) і двонаправленому (передача надлишкової енергії в мережу до 61% від локальної генерації). Інтеграція з цифровими платформами (Danfoss Leanheat Monitor)

забезпечує моніторинг у реальному часі, дозволяючи оптимізувати режими роботи залежно від ринкових тарифів і зовнішніх умов.

На основі запропонованої схеми подано заявку на патент (Додаток Г), зареєстровану під номером IN 18196. Ця заявка стала частиною договору про передачу інтелектуальних прав власності між автором дисертації та компанією Danfoss A/S, розташованою за адресою Nordborgvej 81, 6430 Nordborg, Denmark. Договір закріплює права компанії на використання розробленої схеми 2Н-ІТП у її продуктах і рішеннях для теплопостачання, підкреслюючи комерційну цінність і практичну значущість розробки. Патентна заявка охоплює унікальні технічні рішення, зокрема двонаправлену циркуляцію теплоносія та інтеграцію локальних джерел тепла, що забезпечують новизну та конкурентоспроможність системи на глобальному ринку енергоефективних технологій.

Експериментальні дослідження. У результаті експериментальних досліджень, проведених на лабораторному стенді 2Н-ІТП, було підтверджено здатність системи ефективно функціонувати в трьох ключових режимах: споживання тепла від ЦТ, теплопостачання від локального джерела (електричного котла, що імітує тепловий насос), а також передача надлишкової енергії назад у систему ЦТ.

У режимі комбінованої роботи, за добу система опалення спожила 13 кВт·год теплової енергії, з яких 12 кВт·год було згенеровано локальним джерелом, а 10 кВт·год надано з боку централізованого теплопостачання. При цьому 9 кВт·год теплової енергії було повернуто в тепломережу, що свідчить про високий рівень рекупераційного потенціалу (90 % від виробленого локальним джерелом тепла). Таким чином, у загальному енергетичному балансі системи 23,1 % тепла забезпечено локальним джерелом, тоді як 76,9 % — системою ЦТ.

У ході експериментів було зафіксовано періоди повної автономності системи. Наприклад, з 10:30 до 15:00 2 квітня 2025 року 2Н-ІТП працював виключно за рахунок тепла, накопиченого у баку-акумуляторі, без залучення централізованого джерела. При цьому температура подачі підтримувалась на рівні 35 °С, а теплова потужність з боку ЦТ дорівнювала нулю. Такі режими

підтверджують здатність системи забезпечувати безперервне теплопостачання в умовах мінімального зовнішнього втручання.

У режимі рекуперації, що активувався автоматично при досягненні 48°C у верхній зоні бака, 2Н-ІТП демонстрував стабільну передачу надлишкової енергії в тепломережу. Протягом 4–6 квітня система повернула в ЦТ $18\text{ кВт}\cdot\text{год}$ теплової енергії, зростаючи з $618,0$ до $636,0\text{ кВт}\cdot\text{год}$ за показником лічильника. У пікові моменти потужність рекуперації перевищувала $2,7\text{ кВт}$, що забезпечувало зниження залучення тепла з централізованої системи до рівня $0,2\text{ кВт}$.

Аналіз параметрів теплоносія показав, що температура на виході з локального джерела досягала 80°C під час фази заряджання, після чого поступово знижувалася до контрольного рівня 53°C . Витрата теплоносія в контурі локального джерела залишалась стабільною, на рівні близько 62 л/год , що забезпечувало ефективне акумулювання. Перемикання між джерелами тепла, а також активація режимів рекуперації, здійснювались за допомогою електронного регулятора ECL Comfort 310 (програма P501.1) в автоматичному режимі без участі оператора, із високою точністю підтримання температурних параметрів (відхилення не перевищували $0,5^{\circ}\text{C}$).

Оцінка тепловізійних зображень підтвердила можливість передачі надлишкової енергії в мережу ЦТ. Так, температура теплоносія в точці введення надлишкового тепла сягала $41,3^{\circ}\text{C}$, тоді як температура в загальному колекторі тепломережі, до якого було підключено декілька споживачів, не перевищувала $33,9^{\circ}\text{C}$. Це свідчить про сприятливі умови для енергетичного обміну за рахунок різниці температурних потенціалів.

Узагальнення результатів експериментів дозволяє зробити висновок про стабільну роботу 2Н-ІТП в умовах змінного теплового навантаження, здатність до гнучкого перемикання між джерелами тепла, високий ступінь автоматизації і можливість повернення надлишкової енергії до мережі. Така функціональність робить систему перспективною для застосування в малих та середніх об'єктах, а також для інтеграції у сучасні концепції розумного теплопостачання та децентралізованих енергетичних систем..

Методика інженерних розрахунків. Розроблено комплексну методику розрахунку 2Н-ІТП, яка охоплює вибір обладнання, розробку алгоритмів керування та рекомендації щодо автоматизації. Методика включає підбір високоефективного обладнання: паяні теплообмінники регульовальні клапани, циркуляційні насоси з інверторним керуванням, баки-акумулятори тощо. Алгоритми адаптивного керування базуються на електронному регуляторі, призначеному для керування тепловими пунктами, забезпечуючи погодозалежне регулювання та динамічну адаптацію до змін зовнішньої температури (від -20°C до $+15^{\circ}\text{C}$) і теплового навантаження. Методика враховує гідравлічну стабільність системи за допомогою комбінованого клапана з обмеженням максимальної витрати і стабілізацією перепаду тиску, що запобігає розбалансуванню теплової мережі. Рекомендації щодо автоматизації включають інтеграцію з SCADA-системами та цифровими платформами, що забезпечують зниження експлуатаційних витрат і підвищення енергоефективності.

Вплив 2Н-ІТП на систему ЦТ. Впровадження 2Н-ІТП сприяє зниженню температури теплоносія в мережі ЦТ (з $90/70^{\circ}\text{C}$ до $60/40^{\circ}\text{C}$), що скорочує теплові втрати на 10–15% і підвищує ефективність теплових насосів на 20%. Двонаправлена циркуляція теплоносія дозволяє балансувати пікові навантаження, зокрема за рахунок повернення надлишкової енергії (до 61% від локальної генерації), що зменшує потребу в пікових котельнях і знижує залежність від викопного палива (газу, вугілля) на 30–40%. Інтеграція ВДЕ (сонячні колектори, теплові насоси) підвищує їх частку в енергетичному балансі до 50–100% у пікові періоди, що відповідає європейським цілям декарбонізації. Гідравлічна стабільність мережі забезпечується завдяки диференційному регулюванню, яке запобігає перевантаженням і забезпечує сумісність з низькотемпературними мережами 4ПЦТ і 5ПЦТХ. У контексті воєнних викликів, 2Н-ІТП сприяють децентралізації теплопостачання, знижуючи вразливість до руйнувань централізованих джерел тепла і підвищуючи енергетичну стійкість.

Бар'єри та рекомендації щодо впровадження. Визначено основні бар'єри впровадження 2Н-ІТП: технічні (невідповідність температурних режимів у старих мережах, гідравлічні обмеження через односпрямований дизайн та розбалансування тощо), регуляторні (відсутність нормативної бази для теплових просюмерів, зокрема стандартів для двонаправленої взаємодії) та ринкові (відсутність механізмів комерціалізації надлишкової теплоти, монополізація теплового ринку). Технічні бар'єри включають потребу в модернізації мереж (заміна труб, встановлення регульованих насосів), регуляторні — відсутність аналогів “зеленого” тарифу для теплової енергії, ринкові — невизначеність цін на надлишкову теплоту. Запропоновано рекомендації: адаптація законодавства (введення гнучких тарифних механізмів, розробка стандартів для просюмерів), створення ринку теплової енергії (аналогічно електроенергетичним платформам), гармонізація з європейськими стандартами (Директива EU/2023/1791), впровадження цифрових платформ для моніторингу. Ці заходи сприятимуть формуванню теплових кооперативів і peer-to-peer торгівлі теплом, підвищуючи економічну привабливість для споживачів і операторів мереж.

Перспективи розвитку. Подальші дослідження рекомендовано зосередити на вдосконаленні технічних рішень: розробка адаптивних систем регулювання (наприклад, з використанням ШІ для прогнозування попиту), інтеграція теплових акумуляторів (розширення взаємодії між різними типами акумуляування та джерелами) для підвищення гнучкості системи, використання ширшого переліку джерела (надлишкове тепло в процесі електролізу, виробництва синтетичних палив та інших джерел, що можуть стати більш доступними в майбутньому). Цифрова трансформація передбачає створення цифрових двійників 2Н-ІТП і їх інтеграцію з SCADA-системами для прогнозного керування та зниження експлуатаційних витрат. Розробка ринкових моделей включає впровадження тарифних механізмів (зворотні тарифи, диференційоване ціноутворення), створення теплових кооперативів і платформ peer-to-peer торгівлі теплом. Гармонізація з європейськими стандартами сприятиме переходу до інтелектуальних мереж 4ПЦТ і 5ПЦТХ, підвищенню енергетичної безпеки та

декарбонізації енергетичного сектору. У контексті післявоєнної відбудови України, 2Н-ІТП можуть стати основою для створення стійких і децентралізованих теплових систем.

Результати дисертаційної роботи створюють наукову та практичну основу для модернізації систем ЦТ, сприяють інтеграції ВДЕ, підвищенню енергоефективності та формуванню гнучкої моделі ринку теплової енергії з активною участю теплових просюмерів. Робота має стратегічне значення для забезпечення енергетичної безпеки України, зниження залежності від імпортованих енергоносіїв і досягнення цілей сталого розвитку.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Parlamento Europeo de la, U. E. (2023). Directive (EU) 2023/1791 of the European Parliament and of the Council of 13 September 2023 on Energy Efficiency and Amending Regulation (EU) 2023/955 (Recast) (Text with EEA Relevance). *Off. J. Eur. Union*, 50, 1-111.
2. «Energy Efficiency Directive. Using energy more efficiently will contribute to reducing the EU's overall energy consumption. The Energy Efficiency Directive is therefore a key driver of Europe's energy transition. »
https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-efficiency-targets-directive-and-rules/energy-efficiency-directive_en
3. Гламаздін, П. М., Баранчук, К. О., & Приймак, О. В. (2021). Нові підходи до організації централізованого теплопостачання. *Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання*, 39, 38-46.
4. 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.
5. «Розвиток централізованого теплопостачання – ключ до розумної енергосистеми в Україні» <https://www.danfoss.com/uk-ua/about-danfoss/articles/dhs/modern-district-heating-enables-transition-to-smart-energy-system-in-ukraine/>
6. 5. Lund, H., Østergaard, P. A., Chang, M., Werner, S., Svendsen, S., Sorknæs, P., ... & Möller, B. (2018). The status of 4th generation district heating: Research and results. *Energy*, 164, 147-159.
7. Баранчук К., Гламаздін П. (2024). Еволюція теплових пунктів: від парових систем до теплових просьюмерів. *Енергоефективність в будівництві та архітектурі*, 14, 66-82
8. Capone, M., Guelpa, E., & Verda, V. (2023). Potential for supply temperature reduction of existing district heating substations. *Energy*, 285, 128597.
9. Latõšov, E., Volkova, A., Hlebnikov, A., & Siirde, A. (2018). Technical improvement potential of large district heating network: application to the Case of Tallinn, Estonia. *Energy Procedia*, 149, 337-344.
10. «Summary of District Heating Systems in the United States», 1877-2020 Morris A. Pierce, PhD m.pierce@rochester.edu *Department of History University of Rochester Rochester, New York 14627-0070*

11. "The Plant of the Boston Heating Company," by Arthur V. Abbott, Read before the Boston Society of Civil Engineers, November 16, 1887, *Association of Engineering Societies* 7(10):389-410 (October 1888)
12. Gallo, E. (2003). Skyscrapers and District Heating, an inter-related History 1876-1933. *Construction History*, 19, 87-106.
13. Mingus, N. B. (2021). *Buffalo Business Pioneers: Innovation in the Nickel City*. Arcadia Publishing.
14. Hanafi, D., Than, M. N. M., Emhemed, A. A., Mulyana, T., Zaid, A. M., & Johari, A. H. (2011, May). Heat exchanger's shell and tube modeling for intelligent control design. In *2011 IEEE 3rd International Conference on Communication Software and Networks* (pp. 37-41). IEEE.
15. Пьянков, К. И. (1942). Система центрального водяного отопления. *Номер патента: 61784. Заявка: 6256, 29.03.1937*
16. «District Heating in the Union of Soviet Socialist Republics with brief n other European Countries» *A Report of The Nationals district heating Association, Prepared by its Educational Committee, 1967*
17. Мазо, А. В., Озерова, И. В., & Судариков, Ю. С. (1974). Элеваторный узел системы центрального отопления. *Номер патента: 414464*
18. Якимов, В. Л., ПОРЫВАЙ, Г. А., & СЕЛЬДИН, Н. Н. (1984). Закрытая водяная система централизованного теплоснабжения. *Номер патента: 1090979*
19. КЫЙВ, Т. А. А. (1985). Элеваторный узел. Номер патента: 1153198, *Заявка 3694411*
20. РОХЛЕЦОВА, Т. Л. (1986). Элеваторная система отопления. *Номер патента: 1257362 Заявка 3798801*
21. ОЛИФИР, В. П., ПЕТУХОВ, Г. Г., & ПОПОВ, В. И. (1977). Кожухотрубный теплообменник. *Номер патента: 566114*
22. Белинский Е. А. Рациональные системы водяного отопления. Л.: Госстройиздат, 1963
23. Дюскин, В. К. "Тепловой и гидравлический режим систем водяного отопления." (1950).
24. Дюскин В. К. и др. Однотрубные системы тепловых сетей. М.: Госэнергоиздат, 1962
25. Ливчак, В. И., & Чистяков, Н. Н. (1976). Улучшение работы ЦТП-реальный путь повышения качества и экономичности теплоснабжения жилых микрорайонов. *Водоснабжение и санитарная техника*, (4), 20-25.

26. Сафонов А. П. Автоматизация систем централизованного теплоснабжения. М.: Энергия. 1974
27. Туркин В. П. Отопление гражданских зданий. Челябинск: Южно-Уральское кн. изд-во, 1974
28. Фаликов В. С. Основные направления автоматизации центральных тепловых пунктов и абонентских вводов. – В кн.: *Научные труды Академии коммунального хозяйства им. К. Д. Памфилова, №75*. М.: ОНТИ АКХ, 1970, с. 82-92.
29. Чистович С. А. Автоматическое регулирование расхода тепла в системах теплоснабжения и отопления. Л.: Стройиздат, 1975
30. Зингер Н.М., Бестолченко В.Г., Жидков А.А. Повышение эффективности работы тепловых пунктов. – М.: Стройиздат, 1990. – 188 с.: ил. – (Экономия топлива и электроэнергии).
31. Зингер Н.М., Бестолченко В.Г., Захаров Г.М. Система автоматического регулирования расхода теплоты на отопление в центральных тепловых пунктах открытых систем теплоснабжения. – *Теплоэнергетика, 1982. - №5. – С. 67–70.*
32. Богословский В. Н. Тепловой режим здания / В. Н. Богословский. – М. : Высшая школа, 1979. – 246 с.
33. Беляйкина И.В., Витальев В.П., Громов Н.К. и др. Водяные тепловые сети: справочное пособие по проектированию. Под ред. Н.К. Громова, Е.П. Шубина. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 376 с.
34. Громов Н.К. Абонентские устройства водяных тепловых сетей: (Проектирование и эксплуатация). – 2-е. изд., перераб. И доп. – М.: Энергия, 1979. – 248 с.
35. Богословский, В. Н. Отопление и вентиляция: учебник для вузов по спец. "Водоснабжение и канализация" / В.Н. Богословский, В.П. Щеглов, Н.Н. Разумов. - 2-е изд., перераб. и доп. - М. : Стройиздат, 1980. - 295 с.
36. Соколов Е.Я., Зингер Н.М., Кононович Ю.В. О схемах автоматизации абонентских установок крупных городских систем централизованного теплоснабжения//*Водоснабжение и санитарная техника, 1980. - №10. – С.17-18*
37. Соколов Е.Я. Теплофикация и тепловые сети. – М.: Энергоиздат, 1982. - 360 с.
38. Соколов Е.Я., Извеков А.В., Булычев А.С. Групповое регулирование отопительной нагрузки. – *Теплоэнергетика, 1985. - №3. – С.50-56.*

39. Панин В.И. Обслуживание коммунальных котельных и тепловых сетей. Учеб. Пособие для подготовки рабочих на производстве. М., Стройиздат, 1974. – 344 с.
40. 5. «District heating history» <https://dbdh.dk/dhc-in-denmark/district-heating-history/>
41. Werner, S.E., Fjärrvärmens utveckling och utbredning, «District heating development and spreading» (Stockholm, 1989)
42. Frederiksen, S. (1982) A thermodynamic analysis of district heating. Doctoral Dissertation. Lund, Sweden: Lund Institute of Technology (unpublished).
43. Böhm, B. (1986) On the optimal temperature level in new district heating networks. Fernwärme International, 15(5): 301-306.
44. Böhm, B. (1988) Energy-economy of Danish district heating systems: A technical and economic analysis. Lyngby, Denmark: Laboratory of Heating and Air Conditioning, Technical University of Denmark.
45. Koskelainen, L. (1980) Optimal dimensioning of district heating networks. Fernwärme International, 9(2): 84-90.
46. Price R. (1977) District Heating in Odense, Denmark. Energy Technology Support Unit, 62p
47. Zinger, N.M., Andreeva K.S., E.M. Fedorov and T.B. Oshchepkova (1976) Hydraulic design of a branched heating network, employing an electronic digital computer. Teploenergetika, 23(11): 20-24.
48. Werner, S.E. (1984) The Heat Load in District Heating Systems. Göteborg, Sweden: Chalmers University of Technology.
49. Total Energy Congress, Total Energy, Proceedings of the First International Total Energy Congress, Eric J. Jeffs (ed), Copenhagen, Denmark, October 4-8, 1976.
50. Rasmussen, C.H. and J.E. Lund (undated) Computer aided design of district heating systems. From District Heating Research and Technological Development in Denmark, Danish Ministry of Energy.
51. Danfoss – The Heating Book: 8 steps to control of heating systems
52. District Heating in Buildings, Requirements and Instructions. *Finnish District Heating Association, Summary of Publication K1/1992.*
53. B. Skagestad, P. Mildenstein. District Heating and Cooling Connection Handbook. IEA district heating and cooling: International Energy Agency. NOVEM, Netherlands Agency for Energy and the Environment, 2002

54. Randløv P, The District Heating Handbook - European District Heating Pipe. Manufacturers Association. Rambøll, 1997
55. Snoek, Chris Yang, Libing, Onno, Tom, Frederiksen, Svend and Korsman, Hans. "Optimization of District Heating Systems by Maximizing Building Heating System Temperature Difference." *Technical report, IEA SHC* (1999).
56. Пырков, В. В. (2007). Современные тепловые пункты. *Автоматика и регулирование.-К.: ИДП «Такі справи», 2007г.-252с.*
57. Єнін, П. М., & Швачко, Н. А. (2007). Теплопостачання (Частина I «Теплові мережі та споруди»): навчальний посібник. *К.: Кондор.*
58. Любарець, О. П., Зайцев, О. М., & Любарець, В. О. (2010). Проектування систем водяного опалення. *Herz Armaturen, Відень–Київ–Сімферополь, 200, 2.*
59. Gustafsson, J., Delsing, J., & van Deventer, J. (2010). Improved district heating substation efficiency with a new control strategy. *Applied energy, 87(6), 1996-2004.*
60. Tol, H. I., & Svendsen, S. (2012). A comparative study on substation types and network layouts in connection with low-energy district heating systems. *Energy Conversion and Management, 64, 551-561.*
61. Gadd, H., & Werner, S. (2013). Heat load patterns in district heating substations. *Applied energy, 108, 176-183.*
62. Gadd, H., & Werner, S. (2015). Fault detection in district heating substations. *Applied Energy, 157, 51-59.*
63. Installations, E. T. F. C. (2008). Guidelines for District Heating Substations. *Euroheat & Power, 68.*
64. Werner, S. (2013). District heating and cooling.
65. Schmidt, D., Lygnerud, K., Werner, S., Geyer, R., Schrammel, H., Østergaard, D. S., & Gudmundsson, O. (2021). Successful implementation of low temperature district heating case studies. *Energy Reports, 7, 483-490.*
66. Thorsen, J. E., & Ommen, T. (2018). Field experience with ULTDH substation for multifamily building. *Energy Procedia, 149, 197-205.*
67. Nunna, A. C., Zong, Y., & Thorsen, J. E. (2023). Demand side flexibility for a Heat Booster Substation with ultra low temperature district heating. *Sustainable Energy, Grids and Networks, 36, 101185.*
68. Yang, X., & Svendsen, S. (2017). Achieving low return temperature for domestic hot water preparation by ultra-low-temperature district heating. *Energy Procedia, 116, 426-437.*

69. Zhu, T., Du, Y., Liang, J., Rohlf, W., Thorsen, J. E., & Elmegaard, B. (2023). Integration of booster heat pumps in ultra-low temperature district heating network: Prototype demonstration and refrigerant charge investigation. *Energy and Buildings*, 298, 113516.
70. Thorsen, J. E., Gudmundsson, O., Tunzi, M., & Esbensen, T. (2024). Aftercooling concept: An innovative substation ready for 4th generation district heating networks. *Energy*, 293, 130750.
71. Gudmundsson, O., Schmidt, R. R., Dyrelund, A., & Thorsen, J. E. (2022). Economic comparison of 4GDH and 5GDH systems—Using a case study. *Energy*, 238, 121613.
72. Gadd, H., & Werner, S. (2015). Fault detection in district heating substations. *Applied Energy*, 157, 51-59.
73. Buffa, S., Fouladfar, M. H., Franchini, G., Lozano Gabarre, I., & Andrés Chicote, M. (2021). Advanced control and fault detection strategies for district heating and cooling systems—A review. *Applied Sciences*, 11(1), 455.
74. Lund, H., Thellufsen, J. Z., Østergaard, P. A., Sorknæs, P., Skov, I. R., & Mathiesen, B. V. (2021). EnergyPLAN—Advanced analysis of smart energy systems. *Smart Energy*, 1, 100007.
75. Pipiciello, M., Caldera, M., Cozzini, M., Ancona, M. A., Melino, F., & Di Pietra, B. (2021). Experimental characterization of a prototype of bidirectional substation for district heating with thermal prosumers. *Energy*, 223, 120036.
76. Pipiciello, M., Trentin, F., Soppelsa, A., Menegon, D., Fedrizzi, R., Ricci, M., ... & Sdringola, P. (2024). The bidirectional substation for district heating users: experimental performance assessment with operational profiles of prosumer loads and distributed generation. *Energy and Buildings*, 305, 113872.
77. Sdringola, P., Ricci, M., Ancona, M. A., Gianaroli, F., Capodaglio, C., & Melino, F. (2023). Modelling a prototype of bidirectional substation for district heating with thermal prosumers. *Sustainability*, 15(6), 4938.
78. Kauko, H., Kvalsvik, K. H., Rohde, D., Nord, N., & Utne, Å. (2018). Dynamic modeling of local district heating grids with prosumers: A case study for Norway. *Energy*, 151, 261-271.
79. Brange, L., Englund, J., & Lauenburg, P. (2016). Prosumers in district heating networks—A Swedish case study. *Applied Energy*, 164, 492-500.
80. DS/CEN/TR16355. Recommendations for prevention of Legionella growth in installations inside buildings conveying water for human consumption. *København: CEN; 2012*.

81. Yang, X., Li, H., & Svendsen, S. (2016). Evaluations of different domestic hot water preparing methods with ultra-low-temperature district heating. *Energy*, 109, 248-259.
82. Schmidt, D. (2024, October). Digitalization of District Heating: Transforming Heat Networks for a Sustainable Future. In *Energy Informatics Academy Conference* (pp. 351-356). Cham: Springer Nature Switzerland.
83. Authority, G. L. (2014). London Heat Network Manual. In *Technical Report*.
84. Sipilä, K., Pietiläinen, J., & Nuorkivi, A. (2015). The building level substation—the innovation of district heating system. *VTT Technical Research Centre of Finland Ltd. Arto Nuorkivi. VTT TECHNOLOGY*, 231.
85. Berglund, J. (2008). District Heating Substations. Design and installation. *The Swedish District Heating Association, Stockholm*.
86. Nussbaumer, T., Thalmann, S., Jenni, A., & Ködel, J. (2020). Handbook on planning of district heating networks. *Bern: Swiss Federal Office of Energy*.
87. ДБН В.2.5-67:2013 «Опалення, вентиляція та кондиціонування» - К.: – [Чинний від 01-01-2014] –К.: Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України, 2013.
88. ДБН В.2.5-39:2008. Теплові мережі. Інженерне обладнання будинків і споруд. Зовнішні мережі та споруди. –[Чинний від 07-01-2009] –К.: Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України, 2009.
89. Червяченко Є., Кузнєцов А., Царук В., Бугрімова Я., Кальницький Р., Пінчук С. (2021) «Варіанти для масштабного встановлення індивідуальних теплових пунктів на основі найкращих міжнародних практик» *USAID «Проект енергетичної безпеки»*
90. Boysen H, Thorsen JE. (2011) "Hydraulic balance in a district heating system", Danfoss, Report No: VF.LR.C2.02, Nordborg, Denmark.
91. Gudmundsson O., Thorsen J. E., Brand M., (2017), "Differential pressure controllers as a tool for optimization of heating systems", *Danfoss Heating Segment Application Centre, Nordborg, Denmark*.
92. Закон України «Про комерційний облік теплової енергії та водопостачання» від 22.06.2017 № 2119-VIII (Текст для друку). [Електронний ресурс. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2119-19/print>].
93. Thorsen, J. E. (2010). Analysis on flat station concept (Preparing DHW decentralised in flats). In *The 12th International Symposium on District heating and cooling*.

ДОДАТОК А

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Гламаздін, П. М., **Баранчук, К. О.**, & Приймак, О. В. (2021). Нові підходи до організації централізованого теплопостачання. Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання, 39, 38-46. <https://doi.org/10.32347/2409-2606.2021.39.38-46>

Особистий внесок здобувача: Описано чотири основних покоління централізованого теплопостачання, основні їх відмінності та можливості провадження найкращих практик в Україні.

2. **Баранчук К. О.**, Любарець О. П. (2025). Еволюція теплових пунктів: від парових систем до теплових просьюмерів. Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання, 53, 2025, с. 6-20. <https://doi.org/10.32347/2409-2606.2025.53.6-20>

Особистий внесок здобувача: Відповідно до базових досліджень про покоління систем теплопостачання розроблено концепцію поколінь теплових пунктів з відображенням ключових змін та поступового розвитку.

3. Тимошенко, А., Погосов, О., Пасічник, П., Кулінко, Є., Козячина, Б., & **Баранчук, К.** (2025). Дослідження технологічних систем паропостачання та можливі шляхи підвищення їх енергетичної ефективності на прикладі пристроїв для розморожування вагонів. Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання, 50, 6–28. <https://doi.org/10.32347/2409-2606.2024.50.6-28>

Особистий внесок здобувача: Виокремлено теплотехнічні особливості існуючої схеми пристроїв для розморожування вагонів портової інфраструктури України з подальшим вивченням промислових процесів, щодо можливого використання надлишку теплової енергії в 2Н-ІТП для інших технологічних процесів виробництва.

4. **Баранчук К.**, Погосов О. Адаптація алгоритму Heat Recovery Control для двонаправлених теплових пунктів та аналіз моделей енергетичного ринку. *Прикладна геометрія та інженерна графіка. Випуск 108* (2025). <https://doi.org/10.32347/0131-579X.2024.107.192-206>

Особистий внесок здобувача: Адаптовано алгоритму Heat Recovery Control (HRC) для використання в архітектурі 2Н-ІТП з локальними джерелами тепла (теплові насоси, сонячні колектори, скидне тепло), а також у проведенні аналізу

актуальних моделей енергетичного ринку для інтеграції концепції теплових просьюмерів у R2R-платформи централізованого теплопостачання.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

5. **Баранчук К.О.** Використання відновлюваних джерел енергії при зеленому будівництві та їх комбінування. Матеріали III Міжнародної науково-практичної конференції «Green Construction» («Зелене будівництво»). Київ: Київський національний університет будівництва і архітектури. 2024, с.31-33.

https://www.knuba.edu.ua/wp-content/uploads/2024/05/zbirnyk_gotovyj-4.pdf

Особистий внесок здобувача: описано можливості по збільшенню частки відновлюваних джерел і комбінації з системами централізованого теплопостачання.

6. **Баранчук К.О.** (2023) Електрифікація централізованого теплопостачання та роль комбінованих теплових пунктів. Робоча програма і тези доповідей міжнародної науково-практичної конференції «Екологія. Ресурси. Енергія» 22-24.11.2023, м. Київ, с. 99-101.

Особистий внесок здобувача: Описано можливості збільшення частки електрифікованих джерел в теплопостачанні та розширені можливості, які надають сучасні теплові пункти.

7. Гламаздін П.М., **Баранчук К.О.** (2023) Перспективи розвитку систем централізованого теплопостачання. Робоча програма і тези доповідей міжнародної науково-практичної конференції «Екологія. Ресурси. Енергія» 22-24.11.2023, м. Київ, с. 87-88. https://www.knuba.edu.ua/wp-content/uploads/2023/11/jere_2023_program_tezy.pdf

Особистий внесок здобувача: Розглянуто основні напрямки розвитку централізованого теплопостачання та синергія енергетичних секторів.

8. Гламаздін П.М., **Баранчук К.О.** (2022) Перспективні напрямки розвитку абонентських вводів. Робоча програма і тези доповідей міжнародної науково-практичної конференції «Екологія. Ресурси. Енергія» 23-25.11.2022, м. Київ, с. 80-81. <http://www.ere.org.ua/>

Особистий внесок здобувача: Описано роль теплових пунктів в сучасних системах централізованого теплопостачання та їх елементний розвиток.

ДОДАТОК Б

МОДЕЛЬ 2Н-ІТП У ВИГЛЯДІ КОДУ ДЛЯ ВИКОРИСТАННЯ В СЕРЕДОВИЩІ МАТЛАВ

У частині *main.m* використано функцію *ode45* для чисельного інтегрування системи диференціальних рівнянь.

```

main.m:
matlab
% Моделювання теплового пункту

clear all;

clc;

% Фізичні константи
cp = 4186; % Питома теплоємність води, Дж/(кг·К)
rho = 1000; % Густина води, кг/м³

% Параметри системи
V_HX1_hot = 0.1; % Об'єм гарячого контуру теплообмінника 1, м³
V_heating = 0.2; % Об'єм системи опалення, м³
V_HP = 0.05; % Об'єм контуру теплового насоса, м³
V_acc = 1; % Об'єм бака-акумулятора, м³
V_HX2 = 0.1; % Об'єм контуру теплообмінника 2, м³

U_HX1 = 200; % Коефіцієнт теплопередачі теплообмінника 1, Вт/(м²·К)
A_HX1 = 2; % Площа теплообміну теплообмінника 1, м²
U_loss = 1.5; % Збільшено: Коефіцієнт теплових втрат, Вт/(м²·К)
A_loss = 5; % Площа поверхні для теплових втрат, м²

m_dot_CT = 0.05; % Зменшено: Масова витрата теплоносія від ЦТ, кг/с
m_dot_heating = 0.1; % Масова витрата в системі опалення, кг/с
m_dot_HP = 0.05; % Масова витрата через тепловий насос, кг/с
m_dot_acc = 0.05; % Масова витрата через бак, кг/с
m_dot_excess = 0.2; % Масова витрата для передачі надлишкового тепла, кг/с

COP_nom = 4; % Номінальний COP теплового насоса

% Час моделювання (доба = 24 години = 86400 секунд)
tspan = 0:60:86400;

% Синусоїдальна температура зовнішнього повітря
T_amb_base = 1.5; % Базова температура, °C

```

```

T_amb_amplitude = 5; % Амплітуда коливань, °C
T_amb = T_amb_base + T_amb_amplitude * sin(2 * pi * tspan / 86400);

% Задана температура в системі опалення
T_set_base = 35; % Базова задана температура, °C
k = 1.0; % Коефіцієнт залежності
T_set = T_set_base + k * (T_amb_base - T_amb);

% Початкові умови
T_CT = 49; % Температура теплоносія від ЦТ, °C
T_HX1_hot0 = 40; % Початкова температура гарячого контуру теплообмінника 1, °C
T_heating0 = 34; % Початкова температура в системі опалення, °C
T_HP_out0 = 48; % Змінено: Початкова температура на виході з теплового насоса, °C (було 46)
T_acc0 = 45; % Початкова температура в баку, °C
T_HX2_out0 = 40; % Початкова температура теплоносія, що повертається в мережу ЦТ, °C

% Вектор стану
y0 = [T_HX1_hot0; T_heating0; T_HP_out0; T_acc0; T_HX2_out0];

% Чисельне інтегрування
[t, y] = ode45(@(t, y) thermal_system(t, y, T_amb, T_set, T_CT, m_dot_CT, m_dot_heating, m_dot_HP, m_dot_acc, m_dot_excess, cp, rho, V_HX1_hot, V_heating, V_HP, V_acc, V_HX2, U_HX1, A_HX1, U_loss, A_loss, COP_nom), tspan, y0);

% Обчислення f_excess на основі результатів інтегрування
f_excess = zeros(size(tspan));
f_excess(y(:, 4) >= 48 & y(:, 3) >= 56) = 1; % T_acc >= 48 i T_HP_out >= 56

% Візуалізація
figure;
subplot(6,1,1);
plot(t/3600, T_amb, 'k-', 'LineWidth', 2);
xlabel('Час (години)');
ylabel('Температура (°C)');
title('Зовнішня температура (T_{amb})');
grid on;

subplot(6,1,2);
plot(t/3600, y(:,1), 'b-', 'LineWidth', 2);
xlabel('Час (години)');
ylabel('Температура (°C)');

```

```

title('Температура гарячого контуру теплообмінника 1');
grid on;

subplot(6,1,3);
plot(t/3600, y(:,2), 'r-', 'LineWidth', 2);
hold on;
plot(t/3600, T_set, 'k--', 'LineWidth', 1, 'DisplayName', 'T_{set}');
xlabel('Час (години)');
ylabel('Температура (°C)');
title('Температура в системі опалення');
legend('T_{heating}', 'T_{set}');
grid on;

subplot(6,1,4);
plot(t/3600, y(:,3), 'g-', 'LineWidth', 2);
xlabel('Час (години)');
ylabel('Температура (°C)');
title('Температура на виході з теплового насоса');
grid on;

subplot(6,1,5);
plot(t/3600, y(:,4), 'm-', 'LineWidth', 2);
xlabel('Час (години)');
ylabel('Температура (°C)');
title('Температура в баку-акумуляторі');
grid on;

% Додаємо графік для f_excess
subplot(6,1,6);
plot(t/3600, f_excess, 'c-', 'LineWidth', 2);
xlabel('Час (години)');
ylabel('Стан');
title('Передача надлишкового тепла в ЦТ (1 = активна, 0 = неактивна)');
ylim([-0.1 1.1]);
grid on;

```

ode45 розв'язує систему рівнянь виду $\frac{dy}{dt} = f(t, y)$, де (y) – вектор стану, а $(f(t, y))$ — функція, визначена в `thermal_system.m`.

`thermal_system.m`

`matlab`

```

function dydt = thermal_system(t, y, T_amb, T_set, T_CT, m_dot_CT,
m_dot_heating, m_dot_HP, m_dot_acc, m_dot_excess, cp, rho, V_HX1_hot, V_heating,
V_HP, V_acc, V_HX2, U_HX1, A_HX1, U_loss, A_loss, COP_nom)

```

```

% Поточні значення
T_HX1_hot = y(1);
T_heating = y(2);
T_HP_out = y(3);
T_acc = y(4);
T_HX2_out = y(5);

% Зовнішня температура та задана температура
T_amb_t = interp1(0:60:86400, T_amb, t);
T_set_t = interp1(0:60:86400, T_set, t);

% Теплове навантаження
Q_load = 5000 + 2000 * (sin(2 * pi * t / 86400 - pi/2) + sin(2 * pi * t /
86400 - 3*pi/2));

% Перевірка, чи активна передача надлишкового тепла
if T_acc >= 48 && T_HP_out >= 56
    f_excess = 1;
    Q_excess = m_dot_excess * cp * (T_acc - T_HX2_out);
else
    f_excess = 0;
    Q_excess = 0;
end

% Теплообмінник 1: закриваємо клапан, якщо передача надлишкового тепла
активна
T_heating_in = T_heating - 5; % Припустимо зворотну температуру
if f_excess == 1
    Q_HX1 = 0; % Клапан закритий
    Q_loss_HX1_hot = U_loss * A_loss * (T_HX1_hot - T_amb_t) * 2; %
Збільшено теплові втрати
    m_dot_CT_effective = 0; % Припиняємо вхідний потік від ЦТ
else
    if (T_CT - T_heating) == (T_HX1_hot - T_heating_in)
        Delta_T_m_HX1 = T_CT - T_heating; % Уникаємо ділення на нуль
    else
        Delta_T_m_HX1 = ((T_CT - T_heating) - (T_HX1_hot - T_heating_in)) /
log((T_CT - T_heating) / (T_HX1_hot - T_heating_in));
    end
    Q_HX1 = U_HX1 * A_HX1 * Delta_T_m_HX1;
    Q_loss_HX1_hot = U_loss * A_loss * (T_HX1_hot - T_amb_t);
    m_dot_CT_effective = m_dot_CT;
end

```

```

    dT_HX1_hot_dt = (m_dot_CT_effective * cp * (T_CT - T_HX1_hot) - Q_HX1 -
Q_loss_HX1_hot) / (rho * V_HX1_hot * cp);

    % Система опалення
    if T_acc >= 38
        f_M1 = 1;
        Q_from_acc = m_dot_acc * cp * (T_acc - T_heating);
    else
        f_M1 = 0;
        Q_from_acc = 0;
    end
    Q_loss_heating = U_loss * A_loss * (T_heating - T_amb_t);
    Q_reg = 20000 * (T_set_t - T_heating); % Пропорційне регулювання
    dT_heating_dt = (m_dot_heating * cp * (T_heating_in - T_heating) + Q_HX1 +
Q_from_acc + Q_reg - Q_load - Q_loss_heating) / (rho * V_heating * cp);

    % Тепловий насос
    T_HP_in = T_acc; % Змінено: T_HP_in дорівнює T_acc, щоб перепад був меншим
    COP = COP_nom * (T_amb_t + 273) / (T_HP_out + 273);
    Q_HP = 1500 * (1 + 0.5 * sin(2 * pi * t / 86400)) * COP; % Збільшено Q_HP
для досягнення 56°C
    Q_loss_HP = U_loss * A_loss * (T_HP_out - T_amb_t);
    if f_excess == 1
        Q_loss_HP = Q_loss_HP + 500; % Додаємо додаткове охолодження
    end
    dT_HP_out_dt = (m_dot_HP * cp * (T_HP_in - T_HP_out) + Q_HP - Q_loss_HP) /
(rho * V_HP * cp);

    % Бак-акумулятор
    Q_loss_acc = U_loss * A_loss * (T_acc - T_amb_t);
    dT_acc_dt = (m_dot_HP * cp * (T_HP_out - T_acc) - Q_from_acc - Q_excess -
Q_loss_acc) / (rho * V_acc * cp);

    % Теплообмінник 2 (передача надлишкового тепла)
    Q_loss_HX2 = U_loss * A_loss * (T_HX2_out - T_amb_t);
    dT_HX2_out_dt = (m_dot_excess * cp * (T_acc - T_HX2_out) * f_excess -
Q_loss_HX2) / (rho * V_HX2 * cp);

    % Система рівнянь
    dydt = [dT_HX1_hot_dt; dT_heating_dt; dT_HP_out_dt; dT_acc_dt;
dT_HX2_out_dt];
end

```

ДОДАТОК В
НАЛАШТУВАННЯ ЕЛЕКТРОННОГО РЕГУЛЯТОРА ПІД ЧАС
ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

ECL310_169604

Device information

Serial no.	169604
Application	P501
Sub application	2
Version	2
Connection	ECL
Device type	ECL
Street	Хвойки 15/15/6
City	04080 Kyiv
Country	Ukraine

Tenant information

Generated by	kyrylo.baranchuk@danfoss.com
Tenant name	Danfoss Ukraine

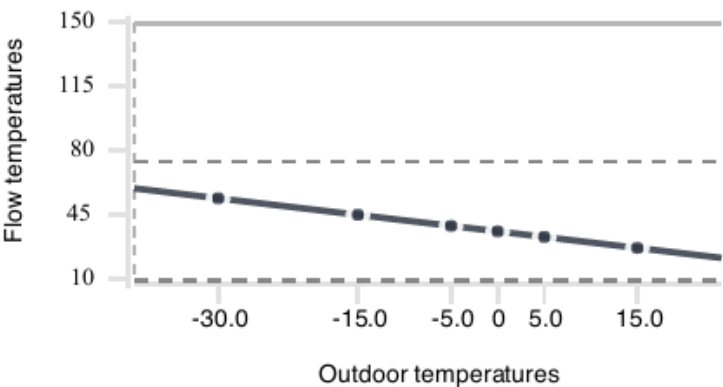
Generated at 5 Jun 2025

Circuit 1, heating

Primary settings

Mode	Scheduled operation
Des. T comfort	19.0 °C
Des. T saving	18.0 °C

Flow temperature



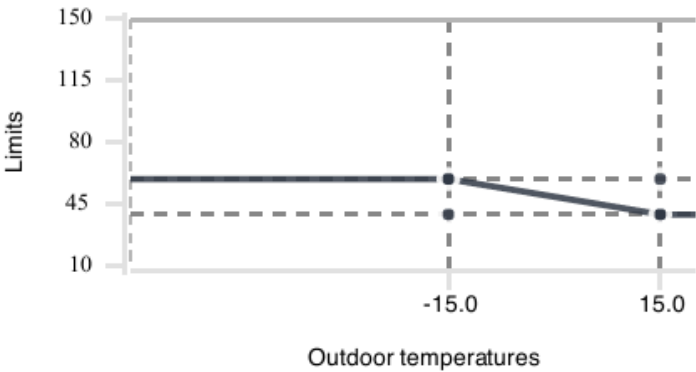
Heat curve	0.6
Maximum temperature	75.0 °C
Minimum temperature	10.0 °C
Temperature at -30 °C	55.0 °C

Temperature at -15 °C	46.0 °C
Temperature at -5 °C	40.0 °C
Temperature at 0 °C	37.0 °C
Temperature at 5 °C	34.0 °C
Temperature at 15 °C	28.0 °C
Desired T	50.0 °C

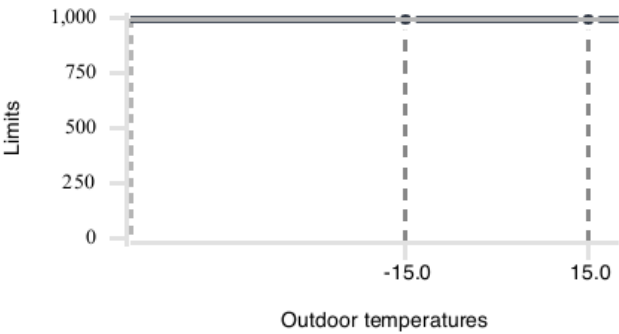
Room limit

Infl. - max.	0
Infl. - min.	0
Adapt. time	Off

Return limit



High limit Y2	60.0 °C
Low limit Y1	40.0 °C
High T out X1	15.0 °C
Low T out X2	-15.0 °C
Infl. - max.	0
Infl. - min.	0
Adapt. time	25.0 s
Priority	Off
Con. T, ret. T lim.	70.0 °C



High limit Y2	999.9 l/h
Low limit Y1	999.9 l/h
High T out X1	15.0 °C
Low T out X2	-15.0 °C
Adapt. time	Off
Filter constant	10.0
Units	portal_unit_desc_litre_per_hour

Optimization

Auto saving	-15.0 °C
Boost	Off
Ramp	Off
Optimizer	9.0
Pre-stop	On
Based on	OUT
Total stop	Off

Control par. 1

Xp	185.0 K
Tn	480.0 s
M run	75.0 s
Nz	1.0 K
Min. act. time	50.0
Xp	180.0 l/h
Tn	430.0 s
Nz	20.0 l/h
Min. Flow	20.0 l/h

Control par. 2

Xp	170.0 K
Tn	450.0 s
M run	60.0 s
Nz	1.0 K
Min. act. time	2.0

Application

ECA addr.	OFF
Demand offset	Off
P demand	On
Send desired T	Off
P exercise	On
M exercise	Off
DHW priority	Off
P frost T	2.0 °C
P heat T	20.0 °C
P post-run	3.0 m
Frost pr. T	10.0 °C
Ext. input	OFF
Ext. mode	COMFORT

Heating cut-out

Sum. start, day	20.0
Sum. start, month	5.0
Summer, cut-out	20.0 °C
Summer, filter	250.0
Winter start, day	20.0
Win. start, month	5.0
Winter, cut-out	20.0
Winter, filter	250.0

Schedule

Monday

Period 1	From: 05:00	To: 10:00
Period 2	From: 16:00	To: 23:00
Period 3	From: 24:00	To: 24:00

Tuesday

Period 1	From: 05:00	To: 10:00
Period 2	From: 16:00	To: 23:00
Period 3	From: 24:00	To: 24:00

Wednesday

Period 1	From: 05:00	To: 10:00
Period 2	From: 16:00	To: 23:00
Period 3	From: 24:00	To: 24:00

Thursday

Period 1	From: 05:00	To: 10:00
Period 2	From: 16:00	To: 23:00
Period 3	From: 24:00	To: 24:00

Friday

Period 1	From: 05:00	To: 10:00
Period 2	From: 16:00	To: 23:00
Period 3	From: 24:00	To: 24:00

Saturday

Period 1	From: 05:00	To: 22:00
Period 2	From: 24:00	To: 24:00
Period 3	From: 24:00	To: 24:00

Sunday

Period 1	From: 05:00	To: 22:00
Period 2	From: 24:00	To: 24:00
Period 3	From: 24:00	To: 24:00

Common

Override

M1	AUTO
P1	AUTO
M2	AUTO
P2	AUTO
P3	AUTO
P4	AUTO
B5	AUTO
V1	AUTO
P6	AUTO
V2	AUTO
P7	AUTO
B8	AUTO
O1	AUTO

Circuit 3

Control par. 1

Xp	80.0 K
Tn	15.0 s
Nz	0.5 K
V out max.	100.0 %
V out min.	10.0 %
Reverse out	YES

Control par. 2

Xp	10.0 K
Tn	8.0 s
Nz	1.0 K
V out max.	100.0 %
V out min.	10.0 %
Reverse out	YES

Application

Start T	30.0 °C
Start difference	3.0 K
Charge start diff.	3.0 K
Charge delay	120.0 s
Max. safety T	47.0 °C
Max. safety diff.	1.0 K
Safety function	2.0
DHW max. T	20.0 °C
DHW max. diff.	6.0 K

M-bus

M-bus configuration

Baud Rate	2400
Start scanning	NONE

Energy Meter 1

Address	7.0
Type	0
Scan Time	60.0 s

Energy Meter 2

Address	17.0
Type	0
Scan Time	60.0 s

Energy Meter 3

Address	21.0
Type	0
Scan Time	60.0 s

ДОДАТОК Г

**ДОГОВІР ПРО ПЕРЕДАЧУ ПРАВ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ВЛАСНОСТІ НА
ВИНАХІД «КОМБІНОВАНІ ТА ДВОНАПРАВЛЕНІ ТЕПЛОВІ ПУНКТИ»,
ЩО СУПРОВОДЖУЄ ПАТЕНТНУ ЗАЯВКУ IN 18196**



**ENGINEERING
TOMORROW**

Danfoss A/S
Danfoss Business System

DK-6430 Nordborg, Denmark
CVR nr. 20 16 57 15

Telephone: +45 7488 2222
Fax: +45 7449 0949

Email: danfoss@danfoss.com
Homepage: www.danfoss.com

Our reference IN18196	Date 07-10-2024	Direct fax +45 7488 2003
		Direct dialing +45 7488 3597

☐ As agreed upon

☐ Supersedes

☐ Returned with thanks

☐ Please phone me

☐ For information

☒ For approval / signature

☒ To be returned

☐ Please acknowledge receipt

☐ For your file

☐ Comments, please

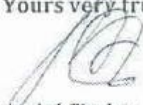
Hi Kyrlo

Please arrange for the signing of document enclosed by all inventors and return ORIGINAL (!) so we can initiate payment of inventor compensation (remuneration).

NB.: PLEASE remember to fill out "Place and date" when signing !!

B.r.
André Fischer
DBS-IP

Yours very truly



André Fischer
A624
andre.fischer@danfoss.com

IN18196

ASSIGNMENT

This assignment (the "Assignment") is entered between

Kyrylo Baranchuk, c/o Danfoss A/S, Nordborgvej 81, DK-6430 Nordborg, Denmark

(the "Assignor(s)")

and

Danfoss A/S, Nordborgvej 81, DK-6430 Nordborg, Denmark

(the "Assignee").

The Assignor(s) is/are the inventor(s) of the invention **Combined and bidirectional district heating substations** which the Assignor(s) informed Assignee of on 24 May 2024 (the "Invention").

The Assignor(s) hereby confirm that I/we have assigned all my/our rights and title to as well as my/our interest in the Invention.

The Assignor(s) agrees that the Assignee may – at its sole discretion – apply for protection of the Invention in any country, keep the Invention as secret know-how or publish the Invention.

The Assignor(s) hereby agree(s) to keep above-mentioned invention and any information directly related to the Invention strictly confidential. Thus, the Assignor(s) shall not

- disclose the Invention in any way or form to any persons or entities outside Danfoss Group; disclose the Invention in any way or form to Danfoss Group employees other than to the extent necessary for the Assignor(s) carrying out of tasks for Danfoss Group, e.g. in connection with a development project;
- make the Invention or part hereof available to the public via, but not limited to, any websites, periodicals, essays etc.;
- make use of the Invention for personal purposes, e.g. filing a patent application privately.

The Assignor(s) also agree(s) to execute any additional assignments and/ or other documents required in connection with this invention as well as to perform any additional acts necessary to enable the Assignee or its successors, legal representatives and assigns to enjoy the full rights of the present Assignment.

Any disclosure Assignor(s) makes in breach of this assignment agreement will result in claim for compensation from Assignee. Furthermore, if Assignor(s) by the time of breach is a Danfoss Group employee, such breach will furthermore result in disciplinary action, up to and including termination of employment, depending upon the severity.

The assignment is irrevocable and is binding for the Assignor(s) also in case of termination of its/their employment at the Assignee.

I/we hereby confirm that the undersigned is/are the inventor(s) of the Invention, and that there are no other inventors.

Kyrylo Baranchuk

Place:	Ukraine, Kyiv
Date:	10.10.2024
Assignor signature:	

Place:	
Date:	
Assignor signature:	

ДОДАТОК Д

ПАТЕНТНА ЗАЯВКА IN 18196 ВІД 24.05.2024

CONFIDENTIAL!



INVENTION DISCLOSURE to Danfoss or Subsidiary		Reference number: IN18196 Date: 05/24/2024	
Please add your answers to each question in the space that follows the question. If you need more space, then please continue your answer on a separate sheet. Often diagrams will help – please add them or send them together with this completed document. After filling out the template, please upload to IDI, or send it to			
01	Title of the invention: <i>Combined and bidirectional (in the literature the name "2-way heating substation" may appear) district heating substations</i>		
02	Number of inventor(s): One		
03	Details of inventor(s)		
	Name	Baranchuk	Kyrylo
	Nationality	Ukrainian	
	Employer	Danfoss TOV	
	BU/Department	Technical Support EER	
	Employee number		
	Job title	Technical support engineer	
	Telephone	+ 3 8050 412 56 33	
	E-mail	Kyrylo.baranchuk@danfoss.com	
	Private address	Kyiv, 9/21 Orest Levytskogo street	
Share of the invention			
04	What is the field of the invention? (Describe in general terms the technical field of the invention). <i>The invention can be applied in district heating and cooling systems, both at the network level and at the level of individual buildings. The invention contributes to the decarbonization of district energy systems and buildings due to the inclusion of renewable energy source and waste heat/cooling.</i>		
05	What is the basic idea of the invention? (Describe in general terms the basic idea of the invention). <i>Evolutionary development of district heating (DH) in 4GDH and 5GDHC systems, where the DH system is combined with a local waste heat source or distributed generation RES to meet prosumer's needs, and the excess heat generated in the process of local production and depending on the building's operating profile, can accumulate and supplies the DH networks.</i>		

CONFIDENTIAL!

Danfoss

Describe in detail your invention and how it works.

(Explain your invention showing alternative solutions where possible. If drawings might help us understand, then please send them as well).

The invention is a heating substation that can be used both at the district level and at the level of individual buildings.

On Fig. 1 shows the scheme of a bidirectional heating substation with the main source in the form of a DH network and a local source in the form of a heat pump. The principle of operation is that the heated water flows from the DH network to the consumer with temperature regulation carried out by the valve (1). The heated water passes through the heat exchanger (2) and is supplied by the pump (3) to the consumer devices (4). The local renewable source (5) can work simultaneously with the network, adjusting the inlet temperature with the valve (6) and with the help of the pump (7), the energy is accumulated in the tank (8). Accumulated heat can be supplied to the needs of the domestic hot water system (DHW) in the tank (9) with the help of the pump (12), where recirculation takes place with the help of the pump (10) and cold water is supplied to the tank through the network (11). In addition, energy can enter the consumer's heating system through and be regulated by the valve (16), and the excess heat is sold to the DH network when the pumps (13) are activated and the heat through the heat exchanger (14) enters the network with a temperature corrected by the valve (15).

06

CONFIDENTIAL

1)

2)

CONFIDENTIAL!



07	What is the technical problem to be solved? (The problem(s) may relate to a diversity of aspects: new functionality, performance, cost reduction, reliability, safety, accessibility). <i>Bidirectional heating substation solves a number of problems:</i> - <i>Increases energy security (the consumer always has access to energy from various sources);</i> - <i>Increases flexibility (you can always choose the best source in terms of energy cost);</i> - <i>Contributes to increasing the share of RES in DH systems, which meets the requirements of Directive (EU) 2023/1791;</i> - <i>Provides access to energy that could not be used before (waste heat of hospitals, data centers next to buildings, expansion of solar stations);</i> - <i>Surplus heat is not lost, and the consumer gets the opportunity to sell it, which stimulates the thermal energy market and its development.</i>
08	Is there a development project relevant to the invention? <i>There is a demo panel in the Danfoss TOV office</i>
09	What are the advantages your invention? (Explain advantages gained by the technical features of the invention, wherever possible compare quantitatively your invention and the best known solutions) <i>As far as I know, there are currently no patented and fully operational bidirectional heating substations. The main advantage is that any local heat source can be used together with the DH system and the heating substation will be able to effectively adjust the set parameters to provide the consumer with heat.</i>

ДОДАТОК Е

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ РОБОТИ



ТОВ з ПІ «Данфосс ТОВ»

04080, м. Київ, вул. В.Хвойки, 15/15/6
(листування: 04080, г. Київ-80, а/с 168)

Тел.: **+380 800 800 144**

Ел. пошта: uacs@danfoss.com

Ел. пошта розробника:

Kyrylo.baranchuk@danfoss.com

АКТ впровадження результатів дисертаційного дослідження Баранчука Кирила Олексійовича «Системи теплопостачання з енергоефективними двонаправленими тепловими пунктами»

Даний акт засвідчує впровадження результатів наукових досліджень здобувача Баранчука Кирила Олексійовича у ТОВ з ПІ «Данфосс ТОВ».

У межах реалізації проекту створення інноваційно теплового пункту було:

- розроблено конфігурації двонаправленого індивідуального теплового пункту (2Н-ІТП), що забезпечує гнучке керування потоками теплової енергії між системою централізованого теплопостачання (ЦТ) та локальними джерелами;
- розроблено рекомендації щодо оптимального підбору обладнання, включаючи теплообмінники, регулювальні клапани, елементи автоматизації тощо, які забезпечують роботу 2Н-ІТП у режимах теплового споживання, накопичення і рекуперації надлишкової енергії до мережі;
- опрацьовано алгоритми керування з адаптивним регулюванням пріоритетів джерел тепла та можливістю роботи в комбінованому та двонаправленому режимах;
- результати роботи реалізовано в складі програми роботи P501.1 для електронного регулятора ECL Comfort 310, що спрямована на підвищення енергоефективності систем ЦТ нового покоління. Результати моделювання можуть бути використані як основа для створення цифрових двійників 2Н-ІТП, інтегрованих у систему ЦТ.

Впроваджені наукові результати є оригінальною науково-технічною розробкою, підтвердженою поданою патентною заявкою IN18196 «Combined and bidirectional district heating substation» від 24.05.2024. Права інтелектуальної власності передано компанії Danfoss A/S, Nordborgvej 81, 6430 Nordborg, Denmark згідно з договором від 07.10.2024.

**Генеральний Директор
ТОВ з ПІ «Данфосс ТОВ»**

Берестян А.В.

ТОВ з ПІ «Данфосс ТОВ»

м. Київ, вул. Вікентія Хвойки 15/15/6, 04080. Тел.: +38 044 461 87 00 • Факс: +38 044 461 87 07