

УДК 519.8: 004.6: 004.9

DOI 10.36910/10.36910/6775-2313-5352-2025-27-9

Іванюта О. Я., Гуменюк Л. О.

Луцький національний технічний університет

КЛАСИФІКАЦІЯ ПІДХОДІВ ТА МЕТОДІВ МОДЕЛЮВАННЯ ІНДИВІДУАЛЬНОГО ТЕПЛОВОГО ПУНКТУ

У роботі проведено аналіз типових схем роботи індивідуальних теплових пунктів. Встановлено, що ІТП забезпечують ефективний розподіл теплової енергії між системами опалення, вентиляції та гарячого водопостачання, адаптуючи параметри теплоносія до потреб конкретної будівлі незалежно від режимів централізованої мережі. Проаналізовано залежні та незалежні схеми підключення, їх переваги та недоліки. Розглянуто підходи до математичного, фізичного та емпіричного моделювання індивідуальних теплових пунктів (ІТП). Моделювання є важливим інструментом для аналізу та оптимізації різних систем, зокрема в теплопостачанні. Вибір методу моделювання залежить від специфіки завдання, доступних ресурсів та необхідної точності результатів. Математичні моделі є ефективними для вирішення задач, де важлива швидкість обчислень, але вони можуть бути менш точними порівняно з фізичними. Фізичні моделі надають високу точність завдяки детальному опису процесів, проте потребують значних обчислювальних потужностей. Емпіричне моделювання дозволяє працювати з реальними даними, але точність таких моделей залежить від якості та обсягу доступної інформації.

Ключові слова: індивідуальні теплові пункти, схеми підключення, моделювання.

Постановка проблеми. Індивідуальний тепловий пункт є ключовим елементом енергоефективної системи теплопостачання будівлі, що забезпечує автоматизоване регулювання подачі тепла з метою створення стабільного мікроклімату та оптимізації енергоспоживання [1]. Завдяки інтегрованим механізмам регулювання, ІТП адаптує рівень теплопостачання до змінних зовнішніх температурних умов, запобігаючи перегріву приміщень у тепліші періоди та підтримуючи необхідний рівень тепла в холодні дні.

Основною функцією теплових пунктів є контроль за витратою та розподілом теплоносія між різними зонами будівлі, такими як радіаторні системи опалення, підлогове опалення тощо. Це дозволяє усунути проблему нерівномірного розподілу теплової енергії, що сприяє покращенню комфорту мешканців та зменшенню енергетичних втрат [2].

Крім того, ІТП відіграє важливу роль у регулюванні гідравлічного балансу системи теплопостачання, стабілізуючи тиск і витрату теплоносія. Це забезпечує не лише ефективну передачу тепла, а й знижує ризик виникнення гідравлічних ударів, шуму в трубопроводах та інших небажаних явищ [2]. Додатково, використання теплового пункту запобігає негативному впливу перепадів тиску в центральній тепловій мережі, що сприяє продовженню експлуатаційного ресурсу всієї системи.

Сучасні ІТП оснащені системами автоматизованого керування, що дозволяє здійснювати моніторинг та коригування параметрів теплопостачання відповідно до графіків використання будівлі. Це, у свою чергу, дозволяє зменшити витрати на опалення в періоди зниженого енергоспоживання, наприклад, у нічний час або під час вихідних днів, що є важливим аспектом підвищення загальної енергоефективності будівлі [3].

Окрім функцій опалення, ІТП здійснює підготовку гарячої води для побутових потреб шляхом використання теплообмінників, які передають теплову енергію від теплоносія до холодної води, забезпечуючи її нагрівання до необхідної температури [4]. Завдяки цьому гаряча вода розподіляється до всіх точок споживання – кранів, душових, побутових приладів – із гарантованим рівнем комфорту та безпеки.

Важливою перевагою ІТП є його незалежність від опалювального сезону: система забезпечує постійне постачання гарячої води протягом усього року. Крім того, можливе інтегрування альтернативних джерел енергії, таких як сонячні теплові колектори чи електричні нагрівачі, що дозволяє додатково зменшити навантаження на централізовану систему теплопостачання.

Індивідуальні теплові пункти (ІТП) являють собою комплекс обладнання, призначений для розподілу теплової енергії від централізованої теплової мережі до систем опалення, вентиляції

та гарячого водопостачання окремої будівлі або її частини. Основною функцією ІТП є забезпечення необхідних параметрів теплоносія (температури і тиску) для кожної системи споживання незалежно від параметрів теплоносія в центральній мережі. Крім того, ІТП дозволяють створювати роздільні контури теплопостачання для різних потреб об'єкта, таких як водяне опалення, «тепла підлога» та гаряче водопостачання [5].

Індивідуальні теплові пункти відрізняються гнучкістю та можуть бути адаптовані до різних типів будівель та теплових мереж з різними вимогами до параметрів теплоносія. Модульні конструкції ІТП спрощують їх монтаж та обслуговування, а також дозволяють легко інтегрувати їх у вже існуючі системи теплопостачання.

Метою роботи є аналіз та класифікація підходів та методів моделювання індивідуального теплового пункту.

Аналіз досліджень і публікацій. Існує кілька основних схем підключення та функціонування індивідуальних теплових пунктів, які можуть бути класифіковані за різними критеріями, включаючи спосіб приєднання до теплової мережі (залежний або незалежний) та кількість ступенів підігріву води для гарячого водопостачання.

Однією з найпростіших залежних схем є схема з елеваторним вузлом [6]. В елеваторі відбувається підмішування охолодженого теплоносія зі зворотної лінії системи опалення до гарячого теплоносія з подавального трубопроводу теплової мережі, що дозволяє знизити температуру теплоносія, який подається до опалювальних приладів.

Іншим варіантом залежної схеми є використання циркуляційного насоса на подавальному трубопроводі системи опалення [7]. Ця схема часто застосовується, коли розрахункова температура теплоносія від джерела тепла перевищує необхідну температуру для системи опалення.

Існують також залежні схеми з циркуляційним насосом на зворотному трубопроводі [8]. Така схема може бути доцільною, коли температура подавального трубопроводу теплової мережі може перевищувати температурні обмеження для циркуляційного насоса.

У незалежних схемах підключення між тепловою мережею та системою опалення встановлюється теплообмінник, який забезпечує передачу тепла від теплоносія центральної мережі до теплоносія, що циркулює в опалювальній системі будівлі, без їх безпосереднього змішування. Зазвичай використовуються розбірні пластинчасті теплообмінники, які є зручними в обслуговуванні та ремонті, а також дозволяють збільшувати потужність системи при необхідності [9].

Більш універсальною є схема з двоступінчастим змішаним приєднанням підігрівачів ГВП. Двоступінчаста схема є ефективнішою, особливо в зимовий період, оскільки дозволяє більш повно використовувати теплову енергію зворотного теплоносія [10].

Викладення основного матеріалу. Математичне моделювання теплотехнічних систем базується на фундаментальних законах збереження маси, енергії та імпульсу, які є основою для розробки відповідних математичних рівнянь. Для опису динамічних процесів у часі використовуються диференціальні рівняння, що дозволяють аналізувати зміну параметрів системи з плином часу. При розробці математичних моделей визначають граничні умови, які описують взаємодію системи з навколишнім середовищем, а також властивості матеріалів, що використовуються в системі [11].

У процесі математичного моделювання часто виникає потреба у спрощеннях та припущеннях для зменшення складності моделі та забезпечення можливості її розв'язання. Важливим аспектом є вибір рівняння стану теплоносія, наприклад, води, та його властивостей, таких як теплоємність, в'язкість та теплопровідність, оскільки ці параметри можуть змінюватися залежно від температури та тиску, що необхідно враховувати при моделюванні в широкому діапазоні робочих умов [12].

Математичне моделювання окремих компонентів ІТП.

Теплообмінники. Математичне моделювання теплообмінників, які є одними з елементів ІТП, може здійснюватися різними методами. Баланс енергії є фундаментальним підходом, що базується на рівняннях теплопередачі, які враховують масові витрати, теплоємності та різницю температур гарячого та холодного теплоносіїв. Метод середньої логарифмічної різниці температур (LMTD) використовує середню температурну різницю між гарячим та холодним теплоносіями вздовж теплообмінника для розрахунку кількості переданого тепла. Метод LMTD є зручним при відомих вхідних та вихідних температурах теплоносіїв, але має обмеження для

складних конфігурацій теплообмінників та випадків, коли коефіцієнт теплопередачі залежить від температури [13].

Метод ефективності-NTU (ϵ -NTU) є більш універсальним підходом, який використовує безрозмірні параметри для визначення ефективності теплообмінника, що є відношенням фактично переданого тепла до максимально можливого. Метод ϵ -NTU є особливо зручним при невідомих вихідних температурах теплоносіїв, а також для теплообмінників зі складними схемами потоків [14].

Насоси. Математичне моделювання насосів в ІТП включає використання характеристичних кривих насосів, які відображають залежність напору (H) від об'ємної витрати (Q). Гідрравлічні розрахунки використовуються для визначення перепаду тиску (Δp) в залежності від витрати та гідрравлічного опору системи, що може включати динамічний перепад тиску. Для моделювання насосів з частотним регулюванням використовуються закони подібності (affinity laws), які описують зв'язок між швидкістю обертання насоса (n) та його характеристиками: витратою (Q), напором (H) та потужністю (P) [12].

Клапани. Математичне моделювання регулюючих клапанів в ІТП базується на їхніх характеристиках витрати. Власні характеристики клапанів відображають залежність відносного коефіцієнта витрати K, від відносного положення клапана h для різних типів клапанів, таких як лінійні, рівнопроцентні та швидкодіючі [12].

Системи керування. Математичне моделювання систем керування в ІТП включає опис алгоритмів керування, таких як ПД-регулятори, математичними рівняннями, які визначають їхню поведінку на основі вхідних сигналів та заданих параметрів. Моделювання датчиків передбачає опис залежності їхнього вихідного сигналу (наприклад, напруги або струму) від вимірюваного параметра, такого як температура, тиск або витрата. Моделювання логіки керування включає опис послідовності дій та рішень, що приймаються системою керування в залежності від вхідних сигналів та внутрішнього стану системи. При моделюванні систем керування може знадобитися врахування затримок у часі реакції компонентів та гістерезису, оскільки ці фактори можуть впливати на стабільність та точність роботи системи керування, особливо в динамічних режимах [12, 15].

Математичне моделювання індивідуальних теплових пунктів (ІТП) є ключовим інструментом для аналізу, оптимізації та вдосконалення їхньої роботи. Воно забезпечує можливість швидкого й відносно недорогого дослідження різних режимів функціонування системи, дозволяючи оцінювати вплив параметрів на ефективність та енергоспоживання.

Підходи до фізичного моделювання ІТП

Фізичне моделювання індивідуальних теплових пунктів передбачає використання спеціалізованого програмного забезпечення для створення віртуальних моделей ІТП та їхніх компонентів. Ці моделі базуються на фундаментальних законах фізики, що описують процеси теплопередачі та гідрравліки, які відбуваються в системі. Фізичне моделювання дозволяє моделювати складні системи з урахуванням взаємодії між різними компонентами, що є важливим для розуміння їхньої комплексної поведінки. Фізичне моделювання дозволяє враховувати складні термогідрравлічні явища та динамічні процеси в ІТП з високою точністю, що особливо важливо для моделювання перехідних режимів роботи, аварійних ситуацій або інтеграції нових технологій [16].

Для фізичного моделювання ІТП використовується різноманітне програмне забезпечення.

Modelica та Dymola застосовуються для моделювання та проєктування двонаправлених теплообмінних підстанцій, призначених для теплових користувачів, з використанням бібліотек компонентів для моделювання трубопроводів, клапанів, насосів та датчиків.

TRNSYS використовується для моделювання сонячних систем теплопостачання, що включають ІТП, дозволяючи моделювати як компоненти підстанції, так і систему опалення будівлі.

Apros є потужним інструментом для створення детальних моделей систем централізованого теплопостачання, включаючи моделювання окремих ІТП споживачів.

Simulink широко застосовується для розробки математичних моделей елементів ІТП, таких як теплообмінники, клапани керування, триходові клапани та відцентрові насоси, з метою їхньої подальшої симуляції в реальному часі.

Різні програмні засоби мають свої особливості та переваги для моделювання ІТП, і вибір конкретного інструменту залежить від поставленої задачі, необхідного рівня деталізації та наявності відповідних бібліотек компонентів.

Фізичне моделювання застосовується для аналізу теплообмінних підстанцій, моделювання теплогидравлічних мереж і оцінки впливу споживачів тепла на роботу системи. Фізичне моделювання дозволяє приймати обґрунтовані рішення щодо проектування, експлуатації та модернізації централізованого тепlopостачання.

Підходи до емпіричного моделювання ІТП

Емпіричне моделювання індивідуальних теплових пунктів базується на використанні історичних даних про їхню роботу, таких як температура, витрата теплоносія, тиск та енергоспоживання. Для побудови моделей застосовуються статистичні методи, включаючи регресійний аналіз та аналіз часових рядів, а також методи машинного навчання, такі як нейронні мережі та дерева рішень. У процесі емпіричного моделювання відбувається ідентифікація ключових факторів, що впливають на поведінку ІТП, наприклад, температура зовнішнього повітря, час доби або день тижня. На основі виявлених закономірностей будуються моделі для прогнозування теплового навантаження, виявлення аномалій у роботі системи та оптимізації її функціонування [17].

Для емпіричного моделювання ІТП застосовуються різноманітні статистичні моделі та методи машинного навчання. Моделі часових рядів, такі як SARIMAX, використовуються для прогнозування теплового навантаження та виявлення відхилень у роботі ІТП шляхом аналізу часової динаміки даних. Нейронні мережі, зокрема багатошарові перцептрони (MLP), демонструють високу ефективність у прогнозуванні теплового навантаження та виявленні складних нелінійних залежностей між різними параметрами системи. Регресійний аналіз застосовується для визначення статистичної залежності енергоспоживання від різних факторів, таких як температура зовнішнього повітря або характеристики будівлі. Методи кластеризації можуть використовуватися для виявлення груп ІТП зі схожою поведінкою, що дозволяє застосовувати колективний моніторинг та виявляти аномалії на основі порівняння поведінки окремих ІТП з поведінкою відповідного кластера. Методи машинного навчання здатні виявляти складні закономірності в даних про роботу ІТП, які можуть бути непомітні при використанні традиційних статистичних методів, що може призвести до більш точних прогнозів та ефективніших стратегій керування [18].

Основними перевагами цього підходу є простота побудови, відсутність необхідності глибоких фізичних знань та можливість швидкої адаптації до нових даних. Проте емпіричні моделі мають і недоліки: вони залежать від якості та повноти вхідних даних, часто є специфічними для конкретної системи й можуть мати обмежену здатність до узагальнення. Також такі моделі важко інтерпретувати, оскільки вони працюють за принципом «чорної скриньки».

Емпіричне моделювання широко використовується в тепlopостачанні, зокрема для моніторингу стану теплових підстанцій, прогнозування теплового навантаження та оптимізації роботи системи. Його застосовують для виявлення неефективної роботи обладнання, оцінки теплових рейтингів на основі інфрачервоної термографії та аналізу енергоспоживання будівель. Використання емпіричних моделей допомагає зменшити витрати на експлуатацію, підвищити надійність системи та оптимізувати її енергоспоживання.

Вибір методу моделювання індивідуальних теплових пунктів (ІТП) залежить від конкретних завдань, доступних ресурсів та необхідного рівня точності.

Математичне моделювання вимагає менше обчислювальних ресурсів, однак його точність може бути нижчою в порівнянні з фізичним моделюванням, особливо коли йдеться про складні фізичні явища. Фізичне моделювання забезпечує високу точність, оскільки детально враховує всі фізичні процеси в системі, проте потребує значних обчислювальних ресурсів та детальних даних про систему. Емпіричне моделювання є простішим у побудові, оскільки не потребує глибоких знань фізики та базується на аналізі даних, однак його точність сильно залежить від якості та обсягу доступних даних. Крім того, такі моделі можуть бути обмеженими у своїй здатності до узагальнення на інші об'єкти або сценарії.

Для різних аспектів роботи ІТП можуть бути більш ефективними різні методи. Наприклад, для детального моделювання теплопередачі в теплообмінниках фізичні методи, такі як метод кінцевих елементів або метод контрольного об'єму, забезпечують найвищу точність. Для гідравлічних розрахунків у насосах та трубопроводах як математичні, так і фізичні моделі дають прийнятні результати, хоча фізичні моделі здатні краще враховувати складні ефекти, такі як турбулентність. Моделювання систем керування може здійснюватися за допомогою математичних рівнянь або спеціалізованих інструментів програмного забезпечення для

фізичного моделювання. Для прогнозування теплового навантаження будівель найефективнішими часто є емпіричні та гібридні моделі, оскільки вони здатні враховувати складні фактори, такі як поведінка мешканців та погодні умови.

Подальший розвиток моделювання ІТП це підвищення точності моделей для опису складних фізичних явищ та нестаціонарних режимів роботи. Серед пріоритетних напрямків досліджень – розробка ефективних методів валідації моделей на основі реальних даних, створення інтегрованих платформ для поєднання ІТП з мережами централізованого теплопостачання, а також застосування штучного інтелекту та машинного навчання для оптимізації моделей.

Ці технології відкривають нові можливості для моніторингу, діагностики та управління ІТП. Моделі реального часу використовуються для виявлення аномалій та прогнозування несправностей, а цифрові двійники – для навчання персоналу, тестування та оптимізації керування. Їх інтеграція з автоматизованими системами може забезпечити створення інтелектуальних систем теплопостачання, здатних адаптуватися до змінних умов у режимі реального часу.

Висновки. Проведено аналіз типових схем роботи індивідуальних теплових пунктів. Встановлено, що ІТП забезпечують ефективний розподіл теплової енергії між системами опалення, вентиляції та гарячого водопостачання, адаптуючи параметри теплоносія до потреб конкретної будівлі незалежно від режимів централізованої мережі. Проаналізовано залежні та незалежні схеми підключення, їх переваги та недоліки. Залежні схеми (зокрема, з елеваторним вузлом або циркуляційними насосами) відрізняються простотою та низькими капітальними витратами, але мають обмежену ефективність регулювання. Незалежні схеми, що передбачають використання теплообмінників, забезпечують гідравлічну ізоляцію системи та кращий контроль параметрів, проте вимагають більших початкових інвестицій.

Розглянуто підходи до математичного, фізичного та емпіричного моделювання індивідуальних теплових пунктів (ІТП). Моделювання є важливим інструментом для аналізу та оптимізації різних систем, зокрема в теплопостачанні. Вибір методу моделювання залежить від специфіки завдання, доступних ресурсів та необхідної точності результатів. Математичні моделі є ефективними для вирішення задач, де важлива швидкість обчислень, але вони можуть бути менш точними порівняно з фізичними. Фізичні моделі надають високу точність завдяки детальному опису процесів, проте потребують значних обчислювальних потужностей. Емпіричне моделювання дозволяє працювати з реальними даними, але точність таких моделей залежить від якості та обсягу доступної інформації.

Інформаційні джерела

1. ДБН В.2.5-39:2008 Інженерне обладнання будинків і споруд. Зовнішні мережі та споруди. Теплові мережі. Зі Зміною № 1. [Чинний від 2018-07-01]. Київ: УкрНДІнжпроект, 2008. 45 с.
2. Робочі схеми автоматизації систем опалення будівель. URL: <https://firebox.com.ua/uk/shemy-avtomatizacii-sistem-teplosnabzheniya-zdanij/> (дата звернення: 01.06.2025).
3. Оптимізація теплопостачання об'єктів. URL: <https://www.svaltera.ua/press-center/articles/4374.php> (дата звернення: 01.06.2025).
4. Квартирні теплові пункти: застосування для опалення та ГВП. URL: <https://aw-therm.com.ua/kvartirnij-teplovij-punkt-zastosuvannya-dlya-opalennya-ta-gvp/> (дата звернення: 01.06.2025).
5. Індивідуальні теплові пункти: переваги встановлення та роль у реформуванні системи теплопостачання. URL: <https://energysecurityua.org/ua/blogs-ua/individualni-teplovi-punkty-perevahy-vstanovlennia-ta-rol-u-reformuvanni-systemy-teplopostachannia/> (дата звернення: 01.06.2025).
6. Індивідуальний тепловий пункт для багатоквартирного будинку: схеми та рішення. URL: <https://aw-therm.com.ua/individualnij-teplovij-punkt-shemi-ta-rishennya/> (дата звернення: 01.06.2025).
7. Schemes of the heating substation for the heating system. URL: <https://www.ter-en.com/en/skhema/itp> (дата звернення: 01.06.2025).

8. Автоматизовані індивідуальні теплові пункти. Будівництво і експлуатація. URL: https://www.mdi.org.ua/images/Files/MERP/Lutsk_sem_21-23092016_presentations/Lutsk_sem_21-23092016_pres_ITP_Koliienko-5.pdf (дата звернення: 01.06.2025).
9. Індивідуальний тепловий пункт – що це, принципи, схеми, поради. URL: <https://bio.ukr.bio.ua/articles/9932/> (дата звернення: 01.06.2025).
10. Use of a two-stage combined scheme for heat exchangers connection in heating points for hot water supply of insulated buildings. URL: https://www.researchgate.net/publication/384574980_USE_OF_A_TWO-STAGE_COMBINED_SCHEME_FOR_HEAT_EXCHANGERS_CONNECTION_IN_HEATING_POINTS_FOR_HOT_WATER_SUPPLY_OF_INSULATED_BUILDINGS (дата звернення: 01.06.2025).
11. Mathematical Models of Thermal Systems. URL: <https://lpsa.swarthmore.edu/Systems/Thermal/SysThermalModel.html> (дата звернення: 01.06.2025).
12. District heating substation elements modeling for the development of the real-time model. URL: https://www.researchgate.net/publication/330861901_District_heating_substation_elements_modeling_for_the_development_of_the_real-time_model (дата звернення: 01.06.2025).
13. Log Mean Temperature Difference (LMTD) Method. URL: <https://library.fiveable.me/heat-mass-transfer/unit-5/log-temperature-difference-lmtd-method/study-guide/IVMM1ZblQzMWnsbX> (дата звернення: 01.06.2025).
14. Effectiveness-NTU Method. URL: <https://library.fiveable.me/heat-mass-transfer/unit-5/effectiveness-ntu-method/study-guide/kz42EsEzE0KkHv4t> (дата звернення: 01.06.2025).
15. Management and Control for Optimal Performance of the Heating. URL: <https://oaktrust.library.tamu.edu/server/api/core/bitstreams/95fa234b-2558-4c5f-b0f9-267ee13d49e7/content> (дата звернення: 01.06.2025).
16. A Simple Approach to Modeling Rural and Urban District Heating. URL: https://www.researchgate.net/publication/328295827_A_Simple_Approach_to_Modeling_Rural_and_Urban_District_Heating (дата звернення: 01.06.2025).
17. Sizing of district heating systems based on smart meter data: Quantifying the aggregated domestic energy demand and demand diversity in the UK. URL: <https://discovery.ucl.ac.uk/id/eprint/10089142/1/Wang%20Manuscript%20Final.pdf> (дата звернення: 01.06.2025).
18. Statistical Modelling of Individual Substations in a District Heating System. URL: <https://lup.lub.lu.se/luur/download?func=downloadFile&recordId=8949358&fileId=8949370> (дата звернення: 01.06.2025).

Ivanyuta O., Gumeniuk L.

Lutsk national technical university, Lutsk, Ukraine

CLASSIFICATION OF APPROACHES AND METHODS FOR MODELING INDIVIDUAL HEAT POINTS

The paper analyzes typical operating schemes of individual heating units. It has been established that individual heating units ensure efficient distribution of thermal energy between heating, ventilation, and hot water supply systems by adapting the parameters of the heat carrier to the needs of a particular building, regardless of the modes of the centralized network. Dependent and independent connection schemes, their advantages and disadvantages are analyzed. Approaches to mathematical, physical, and empirical modeling of individual heating points (IHP) are considered. Modeling is an important tool for analyzing and optimizing various systems, particularly in heat supply. The choice of modeling method depends on the specifics of the task, available resources, and the required accuracy of the results. Mathematical models are effective for solving problems where speed of calculation is important, but they may be less accurate than physical models. Physical models provide high accuracy due to their detailed description of processes, but require significant computing power. Empirical modeling allows

working with real data, but the accuracy of such models depends on the quality and volume of available information.

Keywords: *individual heating units, connection diagrams, modeling.*

Дата першого надходження
статті до видання
09.11.2025 р

Дата прийняття статті
до друку
16.12.2025 р.

Дата
оприлюднення
25.12.2025 р.