

Здольник М.О.

<https://orcid.org/0009-0000-3232-1712>

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Степанець О.В.

<https://orcid.org/0000-0003-4444-0705>

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ЦІЛЬОВІ ФУНКЦІЇ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОГО КЕРУВАННЯ ЛОКАЛЬНИМИ ОБ'ЄКТАМИ ТЕПЛОСПОЖИВАННЯ В МУЛЬТИАГЕНТНИХ СИСТЕМАХ

У статті розв'язується актуальна науково-практична задача інтелектуалізації індивідуальних теплових пунктів (ТП) у контексті переходу до сучасних систем централізованого теплопостачання 4-го та 5-го поколінь та реалізації концепції інтегрованих розумних енергетичних систем Smart Energy Systems. Традиційні системи автоматизації, побудовані на базі жорстких погодних графіків та локальних ПД-регуляторів, не здатні ефективно вирішувати багатокритеріальні конфлікти, пов'язані з багатозонними тарифами та динамічними обмеженнями локальних енергомереж. Метою дослідження є розробка та математичне обґрунтування універсальної цільової функції для стратегічного мультиагентного рівня керування ТП.

Запропоновано дворівневу кіберфізичну архітектуру системи керування, яка чітко розмежовує інтелектуальний макрорівень прийняття стратегічних рішень мультиагентною системою та виконавчий рівень класичного регулювання. Основна увага приділена формалізації цільової функції мультиагентної системи керування об'єктами теплоспоживання.

Шляхом псеводинамічного моделювання на добовому горизонті з використанням алгоритму оптимізації L-BFGS-B доведено працездатність та універсальність запропонованого математичного апарату. Доведено, що зміна ролі об'єкта досягається виключно через реконфігурацію вектора вагових коефіцієнтів і форми функцій штрафу. Аналіз результатів симуляції екстремальних збурень підтвердив здатність системи до розв'язання ресурсних конфліктів. Формулювання цільової функції дає змогу системі керування реалізувати стратегію контрольованої деградації: об'єкти житлового фонду діють як гнучке навантаження, беручи участь у програмах управління попитом та знижуючи споживання ціною допустимого дискомфорту, тоді як промислові об'єкти захищають власні технологічні процеси, свідомо приймаючи фінансові штрафи. Впровадження запропонованих рішень перетворює ТП з пасивних споживачів на активні гнучкі вузли, здатні балансувати локальні енергомережі без загрози апаратній чи технологічній безпеці.

Ключові слова: автоматизація технологічних процесів, мультиагентні системи керування, тепловий пункт, децентралізоване керування, цифрова трансформація.

Постановка проблеми. Сучасна енергетика перебуває на етапі фундаментальної трансформації, що характеризується переходом від жорстко централізованих ієрархічних структур до гнучких, децентралізованих мереж, відомих як Smart Energy Systems [1]. У секторі теплопостачання цей процес відображається в еволюції систем централізованого теплопостачання до рівня 4-го (4GDH) та 5-го поколінь (5GDH) [2]. Ключовою

особливістю цих систем є інтеграція різномірних джерел енергії, зниження температурних графіків для зменшення втрат та активна роль споживача, який перетворюється на активного учасника енергетичного обміну. Однак наявні методи автоматизації, що базуються на класичній піраміді АСУТП та ПД-регулюванні, досягли межі своїх можливостей у керуванні такою складністю. Вони не здатні ефективно розв'язувати задачі багатокри-



теріальної оптимізації в реальному часі в умовах стохастичного попиту та змінної генерації.

Запропонований у даному дослідженні перехід до мультиагентних систем (Multi-Agent Systems, MAS) є відповіддю на ці виклики [3]. Архітектура MAS дозволяє декомпонувати складну глобальну задачу керування теплопостачанням на множині локальних задач, що розв'язуються автономними агентами – інтелектуальними індивідуальними тепловими пунктами (ІТП) та навіть їхніми функціонально-логічними частинами. У цій парадигмі ІТП перестає бути пасивним виконавчим механізмом, що відпрацьовує температурний графік, і стає активним учасником ринку, здатним прогнозувати потребу, адаптуватися до змінних тарифів та узгоджувати дії з іншими учасниками мережі.

Центральною науковою та інженерною проблемою при проектуванні таких систем є коректне формулювання цільової функції. Саме математичний вираз цілей агента визначає його поведінку, економічну ефективність та здатність забезпечити комфорт. Ця робота присвячена аналізу та формалізації цільових функцій для двох ключових класів ІТП: житлових будівель та промислових об'єктів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Класичне керування ІТП через фіксовані уставки та «криві опалення» добре працює як мінімально достатня стратегія, але погано масштабується на різні будівлі та режими й створює «людський» бар'єр: налаштування уставок часто потребує високої кваліфікації й досвіду, а грубі уставки призводять до перевитрат енергії або скарг на комфорт. Це добре видно з робіт [4, 5] про перехід до низькотемпературного теплопостачання, де температура зворотної води (i , ширше, ΔT) є критичним показником ефективності мережі, але значною мірою визначається саме споживачами – їхніми тепловими пунктами та теплоспоживальними системами. Централізована система оптимізує роботу «усередненого споживача», часто ігноруючи специфічні потреби окремого будинку чи цеху. Це призводить до конфліктів інтересів, коли глобальний оптимум мережі може порушувати локальні обмеження комфорту [6, 7].

У зв'язку з цим багато дослідників пропонують різні стратегії вдосконалення традиційних методів керування ІТП. Питання стійкості й перерегулювання для теплових пунктів досліджено в роботах про стабільність роботи теплових пунктів з позицій теорії керування [8]. Методи діагностики показують, що на теплових пунктах можна виявляти типові дефекти, такі як низький перепад температур, невідповідні теплові профілі та неякісне регулю-

вання, за даними моніторингу стану обладнання й технологічних параметрів [9]. Керування тепловим пунктом з урахуванням внутрішньої температури та інерції будівлі з потенційною сезонною економією близько 6% завдяки прогнозуванню необхідної температури води на подачі з урахуванням погодних умов та інерції будинку продемонстровано в [7]. У роботі [10] досліджено перехід від статичного температурного графіка до оптимальних законів керування, що мінімізують зворотну температуру й первинну витрату. Цифрові інтелектуальні стратегії (MPC [11], data-driven моделі [12]) перебувають у фокусі уваги дослідників і в окремих випадках експериментально демонструють позитивні результати: зокрема, приблизно 34 % зменшення середнього добового піку енергоподачі [13]; оптимізацію теплоспоживання завдяки model-free reinforcement learning методам керування [14] із заявленим одночасним підтриманням комфорту. Підходи до керування, орієнтовані на реагування на запити тепломереж, показують системні вигоди від керування піками й зміщенням навантаження [5].

Альтернативою традиційним підходам до керування контурами ІТП є також застосування мультиагентної архітектури. Система складається з множини агентів, які мають локальні знання, локальні цілі та здатність до комунікації. Дослідження [15] доводять, що MAS дозволяє досягти кращого балансу навантаження та знизити виробничі витрати без погіршення якості послуг. У таких системах обчислення проводяться на рівні контролера ІТП із залученням, за потреби, сторонніх обчислювальних і комунікаційних можливостей. Агент не просто реагує на відхилення температури, а діє на випередження, використовуючи прогноз погоди та моделі поведінки користувачів [16, 17]. Агенти можуть кооперуватися, наприклад, для згладжування піків навантаження на район, або конкурувати за ресурс [15] для забезпечення оптимізаційної стратегії вищого рівня в умовах обмежень.

Разом з тим, забезпечення стратегій енергоефективного теплоспоживання має відповідати формальним правилам і вимогам, які задають прийнятні умови для більшості людей та метрики оцінювання комфорту. Серед них варто відзначити міжнародні норми ASHRAE Standard 55 [18], який визначає комбінації факторів середовища та персональних факторів, що забезпечують задовільні теплові умови для більшості людей; ISO 7730:2025 [19], що задає аналітичну методику оцінювання загального теплового комфорту через PMV/PPD

та локальний дискомфорт; EN 16798-1:2019 [20], що визначає параметри внутрішнього середовища для проектування та оцінювання енергоефективності. Для України варто враховувати національні прийняття європейських та міжнародних норм, зокрема ДСТУ Б EN ISO 7730:2011, ДСТУ Б EN 15251:2011 та ДСТУ EN 16798-1:2022 [21].

Постановка завдання. На основі проведеного аналізу встановлено, що існуючі підходи до керування індивідуальними тепловими пунктами переважно орієнтовані або на локальне стабілізаційне регулювання, або на окремі методи оптимізації енергоспоживання, проте не забезпечують універсального формалізованого підходу до багатокритеріального стратегічного керування в умовах змінних тарифів, ресурсних обмежень та різної функціональної ролі об'єкта теплоспоживання. У зв'язку з цим постає завдання розробити універсальну цільову функцію мультиагентної системи керування ІТП, яка б дозволяла формалізувати економічні, технологічні та мережеві критерії функціонування об'єкта, забезпечувала адаптацію стратегії керування до типу споживача та створювала основу для синтезу дворівневої кіберфізичної архітектури інтелектуального керування.

Виклад основного матеріалу. Мультиагентний підхід дозволяє переформулювати «керування уставками» у «керування цілями»: ключові показники ефективності (КРІ), такі як комфорт, рахунок за тепло/енергію, пікове навантаження, надійність, «якість зворотки», явно задаються користувачем, а інтелектуальний шар агентів автоматично інтерпретує їх у локальні цілі, глобальні цілі та жорсткі обмеження, погоджені через механізми координації [5].

Для житлових ІТП «цінність» системи керування зазвичай вимірюється не уставками, а стабільністю сервісу та зрозумілими цифрами в платіжці. Мінімізація фінансових витрат є домінуючим фактором. Проте він не є лінійним, так як надмірна економія призводить до масових скарг або пошкодження будівлі через недотримання температурних режимів. Тепловий комфорт може враховувати тривалість перебування системи в комфортній зоні, показники PMV/PPD або, залежно від прийнятого стандарту, категорії внутрішнього середовища. Агент повинен прагнути утримувати показники комфорту у допустимих межах з урахуванням технічних можливостей та обмежень, які накладає постачальник тепла.

Для промисловості пріоритети зміщуються від комфорту людей до стабільності технологічних процесів та жорсткої фінансової дисципліни. Тепло

часто є частиною виробничого циклу: сушіння, підтримання мікроклімату для точного обладнання, відбори теплової енергії або теплоносія на виробничі потреби. Відхилення температури від уставки впливає на протікання виробничих процесів та якість кінцевої продукції. Окремим фактором є пікове споживання тепла енергоємними процесами, що вимагає додаткової оптимізації теплоспоживання окремими системами в часі.

Ключовим етапом у синтезі інтелектуальної системи керування є перехід від словесних описів КРІ до формалізованих цільових функцій для агентів.

Для забезпечення максимальної надійності, стійкості до збурень та апаратної безпеки теплових пунктів, пропонується реалізація мультиагентної системи у вигляді дворівневої ієрархічної структури. Така архітектура органічно поєднує гнучкість децентралізованих рішень із детермінованістю класичної автоматики. Агенти контурів (Агент опалення, Агент ГВП, Агент мережі тощо) функціонують на макрорівні з певним дискретним кроком k . Шляхом переговорів та оптимізації цільової функції (1.1) вони знаходять глобальний консенсус щодо розподілу ресурсів і генерують вектор оптимальних динамічних уставок U_k^{set} . Виконавчий рівень складається з класичних ПД-регуляторів, розгорнутих на рівні ПЛК.

На макрорівні кожен локальний агент мінімізує універсальну цільову функцію на горизонті прогнозування. Незалежним аргументом оптимізації виступають динамічні цільові уставки, наприклад, температура подачі.

$$\min_{U_k^{set}} J_{agent} = \sum_{k=0}^H (w_C \cdot C_k + w_D \cdot P_{dev,k} + w_E \cdot P_{peak,k} + w_R \cdot P_{ret,k} + w_W \cdot P_{wear,k}), \quad (1.1)$$

де вектор ваг $W = [w_C, w_D, w_E, w_R, w_W]$ є унікальним ідентифікатором ролі об'єкта, а компоненти функції описують аспекти його функціонування.

Компоненти цільової функції визначаються наступним чином.

Економічний критерій C_k мінімізує фінансові витрати:

$$C_k = E_{th,k} (U_k^{set}, T_{out,k}) \cdot c(k) \quad (1.2)$$

C_k залежить від очікуваного споживання енергії $E_{th,k}$, яка потрібна для досягнення уставки U_k^{set} , зовнішнього некерованого збурення – температури $T_{out,k}$, та профілю динамічного тарифу $c(k)$.

Критерій дотримання температурного регламенту $P_{dev,k}$ формалізує вимоги до комфорту або технологічного процесу.

$$P_{dev,k} = \max(0, T_{min} - T_{zone,k})^n + \max(0, T_{zone,k} - T_{max})^m \quad (1.3)$$

Він штрафує за вихід фактичної температури $T_{zone,k}$ за межі цільового діапазону $[T_{min}, T_{max}]$. Ступені n та m визначають «жорсткість» обмежень. Наприклад, $n=2$ для еластичної зони комфорту житлового будинку; $n=4$ для критичного технологічного бар'єра у промисловості.

Критерій дотримання мережевих лімітів $P_{peak,k}$ запобігає перевантаженню локальної енергомережі.

$$P_{peak,k} = \max(0, P_{req,k}(U_k^{set}) - E_{max,k})^2 \quad (1.4)$$

Цей критерій генерує квадратичний штраф, якщо теплова або електрична потужність $P_{req,k}$, необхідна для реалізації уставки U_k^{set} , перевищує динамічний ліміт $E_{max,k}$, виділений Агентом Мережі.

Критерій системної ефективності $P_{ret,k}$ відображає вимоги концепцій 4GDH/5GDH щодо максимального зняття тепла.

$$P_{ret,k} = \max(0, T_{ret,k}(U_k^{set}) - T_{target}(T_{out,k}))^2 \quad (1.5)$$

$P_{ret,k}$ генерує штраф, якщо фактична температура зворотного теплоносія $T_{ret,k}$ перевищує нормативне значення T_{target} , що залежить від режиму роботи тепломережі та її температурного графіка.

Критерій збереження ресурсу обладнання $P_{wear,k}$ запобігає генерації стрибкоподібних або високочастотних коливань уставок, захищаючи виконавчий рівень від нестабільності.

$$P_{wear,k} = (U_k^{set} - U_k^{set})^2 \quad (1.6)$$

Гнучкість універсальної функції та її здатність адаптуватися до різних типів споживачів досягається завдяки зміні математичної природи компонента комфорту/регламенту та відповідного вектора вагових коефіцієнтів. Оскільки мультиагентна система працює на стратегічному рівні, штрафні функції оцінюють не прямі дії виконавчих механізмів, а прогнозовані наслідки відпрацювання згенерованих уставок локальними контурами.

Роль «Житловий будинок» характеризується високим пріоритетом економічного критерію w_c та еластичністю вимог до температурного режиму. Штраф P_{dev} формалізується як поліном низького ступеня з широкою «мертвою зоною», наприклад, всередині якої $P_{dev} = 0$. Це дозволяє агенту генерувати динамічні уставки, які використовують теплову інерцію будівлі як віртуальний акумулятор енергії. Агент може свідомо задати ПД-регулятору занижену теплову уставку для участі в програмах реагування на попит, знаючи, що прогнозоване

плавне зниження температури до нижньої межі мертвої зони не згенерує математичного штрафу, але суттєво зменшить витрати C_k .

Роль «Промисловий об'єкт» визначається домінуванням технологічного регламенту над економічними витратами. Компонент перетворюється на асиметричну експоненційну або поліноміальну бар'єрну функцію високого ступеня. Наприклад, прогнозоване падіння температури нижче критичної межі генерує штраф, що стрімко зростає на порядки. За таких умов оптимізаційне ядро мінімізує ймовірність генерації уставки, яка змусила б ПД-регулятор знизити споживання нижче технологічного мінімуму. Більше того, така конфігурація потенційно спонукає агента застосовувати стратегію превентивного накопичення енергії.

Для верифікації запропонованого математичного апарату та оцінки адаптивності мультиагентної системи було проведено числовий експеримент із застосуванням методів псевдодинамічного моделювання на добовому горизонті. Метою експерименту є демонстрація того, як єдина універсальна цільова функція здатна генерувати принципово різні графіки динамічних уставок для виконавчого рівня регулювання залежно від обраної ролі об'єкта під впливом змінних зовнішніх збурень.

Симуляція охоплює типову 24-годинну добу з дискретним кроком оптимізації в 1 годину. На кожному кроці агенти стратегічного рівня отримують оновлені дані про зовнішні збурення і за допомогою неперервного алгоритму оптимізації розв'язують задачу мінімізації цільової функції (1.1). Як алгоритм оптимізації використано метод L-BFGS-B (Limited-memory Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno with Bounds) [22]. Результатом роботи оптимізатора на кожному кроці є розрахунок вектора оптимальних цільових уставок, які передаються як завдання на детермінований виконавчий рівень. Приймається, що локальні ПД-регулятори забезпечують відпрацювання цих уставок у межах макрокroku з нульовою статичною похибкою. Для забезпечення репрезентативності в умовах ринку енергії наступного покоління ІТП моделюється як гібридний вузол (Power-to-Heat), де вартість генерації тепла безпосередньо залежить від багатозонного електричного тарифу.

Для розрахунку прогнозованих станів системи всередині цільової функції було використано спрощене рівняння статичного теплового балансу будівлі, яке на кожному кроці оптимізації моделює необхідну теплову потужність $P_{req,k}$ (кВт) для підтримання цільової температури $T_{zone,k}$:

$$P_{req,k} = k_{loss} \cdot (T_{zone,k} - T_{out,k}), \quad (1.7)$$

де $k_{loss} = 1,5$ кВт/°С – узагальнений коефіцієнт тепловтрат будівлі або контуру техпроцесу, який у даному експерименті прийнято однаковим для обох досліджуваних ролей, T_{out} – температура навколишнього середовища.

Експеримент проведено паралельно для двох віртуальних об'єктів з абсолютно ідентичними теплофізичними характеристиками (однакові коефіцієнти тепловтрат та площі, наявність жорсткого ліміту локальної мережі $E_{max} = 65$ кВт), але з різними векторами вагових коефіцієнтів W :

– роль «Житловий будинок»: оптимізація налаштована на гнучке реагування на попит. Компонент комфорту має форму широкої мертвої зони (19-21 °С). Пріоритет економічного компонента високий, вектор вагових коефіцієнтів – відповідний цій ролі.

– роль «Промисловий об'єкт»: оптимізація налаштована на жорстке утримання технологічного регламенту. Компонент регламенту реалізовано як асиметричний бар'єр поліноміального ступеня, що експоненційно штрафуює систему за розрахунок уставки, яка призведе до падіння температури нижче 21 °С. Вага штрафу за порушення регламенту на порядок перевищує економічний фактор. Вектор вагових коефіцієнтів відповідає цій ролі.

Для ізолюваного дослідження здатності системи до вирішення ресурсних конфліктів та участі в програмах реагування на попит, у даному експерименті не розглядалися гідравлічні перехідні процеси. Відповідно, вагові коефіцієнти для критеріїв температури зворотної води та зносу виконавчих механізмів були прийняті рівними нулю ($w_R = 0$, $w_W = 0$).

Для створення модельних умов, які характерні для функціонування стійких енергетичних систем громад, згенеровано комплексний профіль добових збурень, що включає чотири ключові сценарії.

1. Температура зовнішнього повітря T_{out} моделюється синусоїдальним профілем від найхолоднішого мінімуму вночі до локального максимуму вдень, що безперервно змінює фізичну потребу будівлі в тепловій потужності.

2. Задано тризонний графік вартості енергії $c(k)$: пільговий нічний тариф (00:00-07:00), стандартний денний та максимальний піковий (07:00-10:00 та 18:00-22:00).

3. Для перевірки реакції системи на дефіцит ресурсу в локальній мережі (відповідь на запити Агента мережі), змодельовано різке двократне

зниження дозволеного ліміту потужності E_{max} у вечірній час (17:00-21:00).

4. О 08:00 змодельовано ранковий пік споживання гарячої води. Цей процес має абсолютний технологічний пріоритет і жорстко резервує значну частину доступного мережевого ліміту об'єкта, створюючи штучний внутрішній дефіцит потужності для контуру опалення.

Проведені числові експерименти дозволяють оцінити ефективність застосування універсальної цільової функції на макрорівні керування ІТП. Візуалізовані результати (часові ряди – рис. 1, теплові карти – рис. 2) відображають еволюцію оптимальних динамічних уставок, які генеруються оптимізаційним ядром та передаються на базовий рівень ПЛК для відпрацювання класичними ПІД-регуляторами.

Добові графіки (рис. 1) демонструють траєкторію динамічних уставок, які мультиагентна система безперервно розраховує та передає на виконавчий рівень.

Аналіз 24-годинних часових рядів демонструє покрокову адаптацію системи.

У періоди відсутності жорстких мережевих обмежень обидва агенти мінімізують споживання, утримуючи температуру на найнижчій дозволеній межі (19°С для житлового сектора, 21°С для промисловості). Оскільки в даній ітерації експерименту оптимізатор працює без предиктивного горизонту, система не здійснює превентивного перегріву будівлі в нічний час, а реагує виключно на поточний баланс тарифів.

Зниження мережевого ліміту до 30 кВт у період вечірнього екстремального дефіциту (17:00-21:00) на тлі похолодання до -10 °С провокує глибокий ресурсний конфлікт. За відсутності ліміту підтримання базових температур вимагало б 43,5 кВт (для 19 °С) та 46,5 кВт (для 21 °С). Система керування житловим будинком демонструє еластичність: агент знижує уставку до приблизно 18,5 °С у піковій точці. Це дозволяє обмежити споживання на рівні приблизно 31-32 кВт, що значно ближче до цільових 30 кВт. Мультиагентна система промислового об'єкта чинить опір: уставка просідає лише до приблизно 20,3 °С, що змушує систему споживати приблизно 37-39 кВт, фактично ігноруючи вимогу мережі заради збереження виробництва. Різна поведінка систем визначається різними значеннями вектора вагових коефіцієнтів.

Моделювання ранкового піку демонструє реакцію на внутрішній дефіцит (рис. 2). При загальному ліміті 65 кВт та пріоритетному резервуванні 30 кВт для ГВП, безпечний залишок для опалення

становить 35,0 кВт. Зовнішня температура становить -5°C .

Аналіз топології цільових функцій демонструє кардинально різні підходи агентів до генерації уставок для ПІД-регуляторів. У випадку житлового будинку агент балансує між штрафом за дискомфорт ($w_D = 50$) та штрафом мережі ($w_E = 10$). Оптимізатор знаходить точку компромісу: цільова уставка $18,7^{\circ}\text{C}$. Для її досягнення фізично необхідно 35,6 кВт. Система приймає рішення незначно порушити ліміт мережі (на 0,6 кВт), оскільки маргінальні втрати від подальшого зниження температури перевищують мережевий штраф.

Для промислового об'єкта стратегія пошуку оптимуму інша. Асиметрична бар'єрна функція ($w_D = 500$) кардинально змінює оптимум. Для утримання суворого регламенту (21°C) знадобилося б 39,0 кВт. Агент знаходить компроміс на рівні уставки $20,4^{\circ}\text{C}$, що вимагає 38,1 кВт потужності. Це свідоме і значне (на 3,1 кВт) порушення ліміту

опалення, оскільки фінансові штрафи від Агента мережі визнаються меншими втратами, ніж зупинка технологічного процесу через критичне падіння температури.

Ці результати підтверджують, що єдина математична модель, керована виключно конфігурацією вагових коефіцієнтів, здатна генерувати адекватні, фізично достовірні стратегії керування для різних типів споживачів, забезпечуючи контрольовану деградацію режимів під час енергетичних криз.

Висновки. У роботі запропоновано та математично обґрунтовано парадигму керування індивідуальними тепловими пунктами на базі мультиагентних систем, що перетворює ІТП з пасивних споживачів на активні та гнучкі вузли сучасних енергомереж.

Ефективність дворівневої кіберфізичної архітектури: Відділення мультиагентного макрорівня прийняття рішень від базового виконавчого рівня

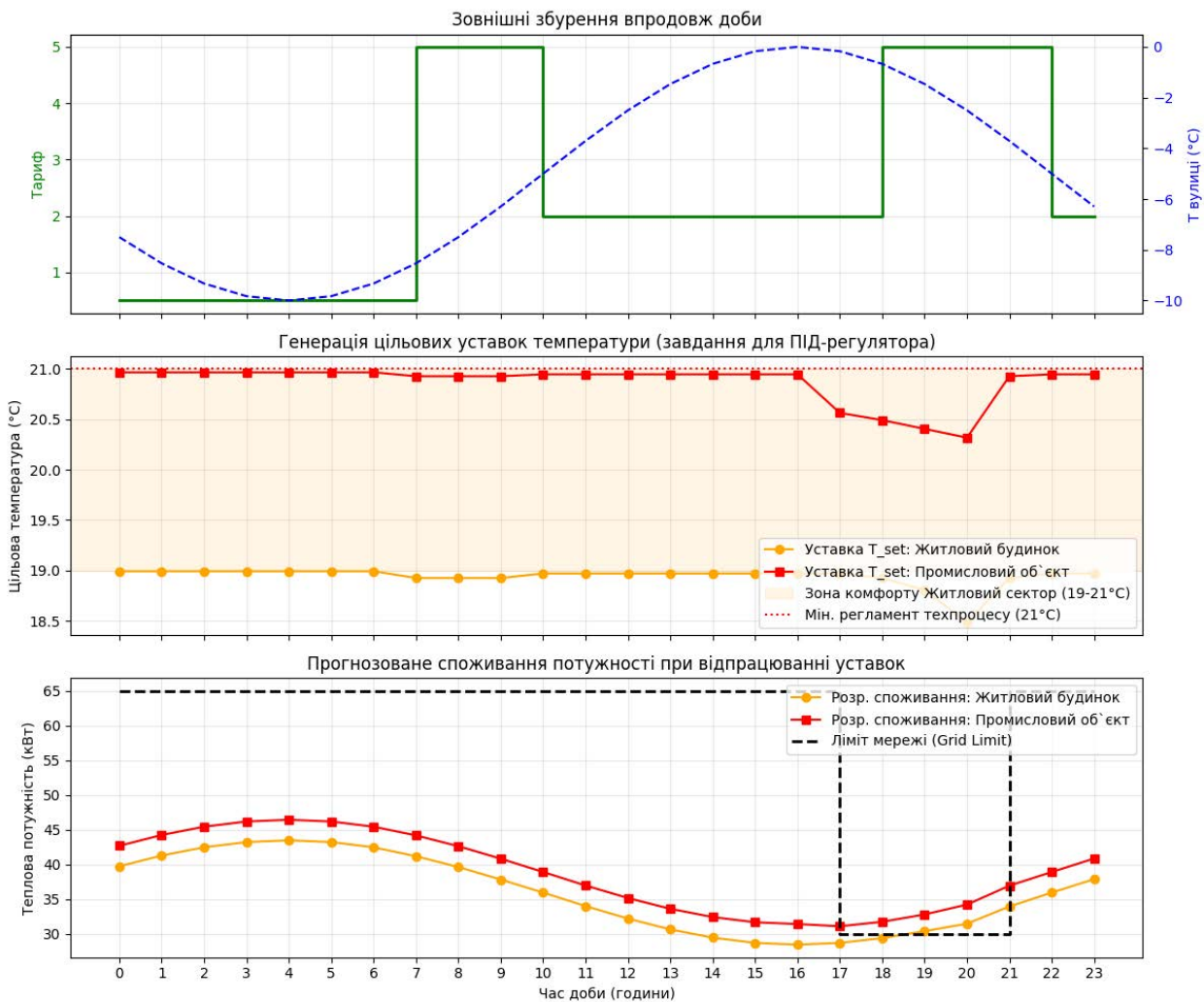


Рис. 1. Симуляція оптимізації уставок мультиагентною системою

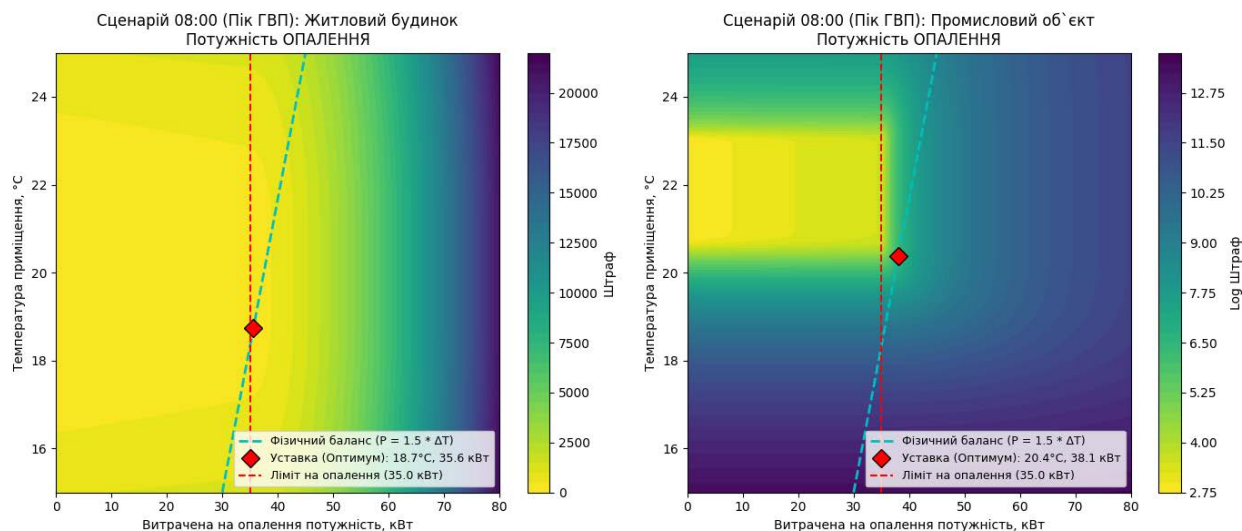


Рис. 2. Простір рішень при ресурсному конфлікті (сценарій 08:00)

регулювання – дозволяє досягти високої надійності керування. Використання алгоритмів жорсткої одновимірної оптимізації для генерації виключно цільових технологічних уставок з підпорядкуванням розрахункової потужності рівнянням теплового балансу повністю усуває ризик виникнення фізично неможливих режимів керування.

Доведено, що запропонована єдина цільова функція здатна адаптувати поведінку ІТП до будь-якої ролі об'єкта. Перехід від стратегії гнучкого споживання у житловому секторі до жорсткого утримання технологічного регламенту в промислових умовах досягається виключно шляхом реконфігурації вектора вагових коефіцієнтів та зміни математичної форми штрафної функції без втручання в базовий алгоритм.

Результати псевдодинамічного моделювання довели здатність агентів знаходити оптимальні

математичні компроміси в умовах екстремального дефіциту потужності. Система автоматично реалізує стратегію контрольованої деградації: об'єкти з високою гнучкістю діють як інструмент управління попитом, знижуючи споживання ціною допустимого дискомфорту, тоді як критична інфраструктура захищає свої показники ефективності, свідомо приймаючи фінансові штрафи мережі.

У поточній реалізації оптимізаційне ядро функціонує на базі покрокової локальної оптимізації. Наступним етапом дослідження стане розробка об'єктно-орієнтованих математичних моделей динаміки теплотехнічних об'єктів. Це дозволить інтегрувати в архітектуру повноцінний алгоритм предиктивного керування із багатокроковим горизонтом планування для реалізації складних стратегій превентивного акумулювання енергії у тепловій ємності будівель.

Список літератури:

1. Smart energy and smart energy systems / H. Lund et al. *Energy*. 2017. Vol. 137. P. 556–565. URL: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.05.123> (date of access: 24.03.2026).
2. Baranchuk K., Liubarets O. Evolution of heating substation: from steam systems to thermal prosumers. *Ventilation, Illumination and Heat Gas Supply*. 2025. Vol. 53. P. 6–19. URL: <https://doi.org/10.32347/2409-2606.2025.53.6-19> (date of access: 24.03.2026).
3. Zdolnyk M. O., Stepanets O. V. MULTI-AGENT APPROACH TO THE ARCHITECTURE OF LOCAL AUTOMATIC CONTROL SYSTEMS FOR INDUSTRIAL AND RESIDENTIAL HEAT SUPPLY FACILITIES. *Scientific notes of Taurida National V.I. Vernadsky University. Series: Technical Sciences*. 2025. Vol. 2, no. 4. P. 133–141. URL: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.4.2/18> (date of access: 24.03.2026).
4. Testing and evaluation of a smart controller for reducing peak loads and return temperatures in district heating networks / T. Van Oevelen et al. *Smart Energy*. 2023. P. 100105. URL: <https://doi.org/10.1016/j.segy.2023.100105> (date of access: 24.03.2026).
5. Guelpa E., Verda V. Demand response and other demand side management techniques for district heating: A review. *Energy*. 2021. Vol. 219. P. 119440. URL: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119440> (date of access: 24.03.2026).

6. Wernstedt F. Multi-agent systems for distributed control of district heating systems /. 2005. URL: <http://www.bth.se/fou/Forskinforso.nsf/allfirst2/51e3dfb98bb6ba6bc1257107002f6d29?OpenDocument> (date of access: 25.03.2026).
7. A dynamic control strategy of district heating substations based on online prediction and indoor temperature feedback / C. Sun et al. *Energy*. 2021. Vol. 235. P. 121228. URL: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121228> (date of access: 24.03.2026).
8. Operation stability analysis of district heating substation from the control perspective / Y. Wang et al. *Energy and Buildings*. 2017. Vol. 154. P. 373–390. URL: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.08.034> (date of access: 24.03.2026).
9. Guelpa E., Verda V. Automatic fouling detection in district heating substations: Methodology and tests. *Applied Energy*. 2020. Vol. 258. P. 114059. URL: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114059> (date of access: 24.03.2026).
10. Oevelen T. V., Vanhoudt D., Salenbien R. Evaluation of the return temperature reduction potential of optimized substation control. *Energy Procedia*. 2018. Vol. 149. P. 206–215. URL: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.08.185> (date of access: 24.03.2026).
11. A new model predictive control approach integrating physical and data-driven modelling for improved energy performance of district heating substations / Z. Zhang et al. *Energy and Buildings*. 2023. P. 113688. URL: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.113688> (date of access: 24.03.2026).
12. Study of an Integrated Control Method for Heating Substations Based on Prediction of Water-Supply Temperature and Indoor Temperature / X. Gao et al. *Buildings*. 2022. Vol. 12, no. 3. P. 351. URL: <https://doi.org/10.3390/buildings12030351> (date of access: 24.03.2026).
13. Testing and evaluation of a smart controller for reducing peak loads and return temperatures in district heating networks / T. Van Oevelen et al. *Smart Energy*. 2023. P. 100105. URL: <https://doi.org/10.1016/j.segy.2023.100105> (date of access: 24.03.2026).
14. Moshari A., Javanroodi K., Nik V. M. Real-world deployment of model-free reinforcement learning for energy control in district heating systems: Enhancing flexibility across neighboring buildings. *Applied Energy*. 2026. Vol. 402. P. 126997. URL: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2025.126997> (date of access: 24.03.2026).
15. Wernstedt F. Multi-Agent Systems for District Heating Management : licentiate thesis. 2003. URL: <http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:bth-00258> (date of access: 25.03.2026).
16. Yao R., Hu Y., Varga L. Applications of Agent-Based Methods in Multi-Energy Systems—A Systematic Literature Review. *Energies*. 2023. Vol. 16, no. 5. P. 2456. URL: <https://doi.org/10.3390/en16052456> (date of access: 24.03.2026).
17. Bayer D., Pruckner M. Enhancing the Performance of Multi-Agent Reinforcement Learning for Controlling HVAC Systems. *2022 IEEE Conference on Technologies for Sustainability (SusTech)*, Corona, CA, USA, 21–23 April 2022. 2022. URL: <https://doi.org/10.1109/sustech53338.2022.9794179> (date of access: 24.03.2026).
18. ANSI/ASHRAE Standard 55-2023. Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. Atlanta : ASHRAE, 2023. URL: <https://www.ashrae.org/technical-resources/bookstore/standard-55-thermal-environmental-conditions-for-human-occupancy>
19. ISO 7730:2025. Ergonomics of the thermal environment – Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria. Geneva : International Organization for Standardization, 2025. URL: <https://www.iso.org/standard/85803.html>
20. EN 16798-1:2019. Energy performance of buildings – Ventilation for buildings – Part 1: Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics (Module M1-6). 2019. URL: <https://epb.center/document/en-16798-1/>
21. Щодо набрання чинності ДСТУ, які реалізують європейські підходи до мікроклімату в приміщеннях: лист; НАМН України від 20.02.2013 № 26/695 // База даних «Законодавство України» / Верховна Рада України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/v0695604-13>.
22. A Limited Memory Algorithm for Bound Constrained Optimization / R. H. Byrd et al. *SIAM Journal on Scientific Computing*. 1995. Vol. 16, no. 5. P. 1190–1208. URL: <https://doi.org/10.1137/0916069> (date of access: 24.03.2026).

Zdolnyk M.O., Stepanets O.V. TARGET FUNCTIONS FOR INTELLIGENT CONTROL OF LOCAL HEAT CONSUMPTION FACILITIES IN MULTI-AGENT SYSTEMS

The article addresses the relevant scientific and practical problem of intellectualizing individual heating substations (IHS) in the context of the transition to modern 4th and 5th generation district heating systems and the implementation of the integrated Smart Energy Systems concept. Traditional automation systems,

based on rigid weather-compensated curves and local PID controllers, are unable to effectively resolve multi-criteria conflicts associated with multi-zone tariffs and dynamic constraints of local energy grids. The research objective is the development and mathematical substantiation of a universal objective function for the strategic multi-agent control level of IHS.

A two-level cyber-physical control architecture is proposed, which clearly distinguishes between the intellectual macro-level of strategic decision-making by the multi-agent system and the executive level of classical regulation. Focus is placed on the formalization of the objective function for the multi-agent control system of heat consumption objects.

Through pseudo-dynamic simulation on a daily horizon using the L-BFGS-B optimization algorithm, the efficiency and versatility of the proposed mathematical apparatus are demonstrated. It is proven that the modification of the object's role is achieved solely through the reconfiguration of the weight coefficient vector and the shape of the penalty functions. Analysis of extreme disturbance simulation results confirmed the system's ability to resolve resource conflicts. The formulation of the objective function enables the control system to execute a graceful degradation strategy: residential facilities act as flexible loads, participating in Demand Response programs and reducing consumption at the cost of acceptable discomfort, whereas industrial facilities protect their own technological processes by deliberately accepting financial penalties. The implementation of the proposed solutions transforms IHS from passive consumers into active flexible nodes capable of balancing local energy grids without compromising hardware or technological safety.

Keywords: *process automation, multi-agent control systems, heating substation, decentralized control, digital transformation.*

Дата першого надходження статті до видання: 25.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 24.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 19.05.2026