

Здольник М.О.Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**Степанець О.В.**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

МУЛЬТИАГЕНТНИЙ ПІДХІД ДО АРХІТЕКТУРИ ЛОКАЛЬНОЇ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ОБ'ЄКТАМИ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ ПРОМИСЛОВОГО ТА ЖИТЛОВОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

У статті досліджено можливості впровадження мультиагентної архітектури у локальні системи автоматичного керування об'єктами теплопостачання, зокрема індивідуальними тепловими пунктами (ІТП) житлового та промислового призначення. Обґрунтовано, що традиційно використовувана централізована структура локальних систем керування ІТП має обмежену здатність до адаптації, масштабування та координації між функціональними модулями, особливо в умовах змінних зовнішніх факторів. З огляду на потреби цифрової трансформації теплової інфраструктури запропоновано концепцію переходу до мультиагентної моделі, в якій кожен функціональний блок ІТП виконує роль автономного програмного агента з чітко визначеною функцією, ціллю керування та інтерфейсами взаємодії. Методологія дослідження базується на системному аналізі контурів керування та принципів функціональної декомпозиції. Для обґрунтування архітектурного підходу проаналізовано структуру двох типових об'єктів: водяного ІТП багатоквартирного житлового будинку та пароводяного ІТП промислового підприємства. Для кожного з них виконано декомпозицію на агентні компоненти, визначено функції, цілі та сценарії взаємодії. Побудовано графи інформаційного обміну між агентами та розроблено приклади поведінки системи в різних режимах – від штатного запуску до аварійних подій або зміни попиту. Концептуально запропоновано технічне рішення реалізації мультиагентної моделі на базі сучасних засобів промислової автоматизації. Результати дослідження демонструють, що перехід до мультиагентної архітектури дозволяє забезпечити адаптивність і гнучкість систем керування, зберігаючи контури регулювання як базові механізми керування. Визначено переваги такої архітектури, зокрема її масштабованість та можливість інтеграції з розподіленими інформаційними платформами. Перспективами подальших досліджень визначено створення прототипів агентних систем для реальних ІТП, застосування машинного навчання для підвищення ефективності рішень та розширення моделі на рівень теплових мереж у концепції Smart Thermal Grid.

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

Постановка проблеми. Попри технічну зрілість технологічних комплексів теплопостачання, зокрема індивідуальних теплових пунктів (ІТП) як об'єктів автоматизації, їхні системи керування здебільшого реалізовані у вигляді централізованої програмної логіки з жорстко визначеними правилами функціонування для кожного контуру. Така структура ефективна за сталих умов, однак позбавлена здатності до локальної оптимізації, координації між модулями чи адаптації до зовніш-

ніх факторів – таких як варіації температурного графіка або навантаження від споживачів. У контексті розвитку інтелектуальних теплових мереж і цифрової трансформації інфраструктури теплопостачання зростає потреба у підходах до автоматизації, які забезпечують гнучкість, автономність і готовність до горизонтальної інтеграції. Мультиагентна архітектура керування відкриває можливість побудови систем, де кожен функціональний модуль ІТП виступає як автономний агент із влас-

ною логікою поведінки та здатністю до взаємодії, що суттєво підвищує загальну адаптивність теплотехнічного об'єкта.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Упродовж останніх років спостерігається зростаючий інтерес до впровадження мультиагентних систем (МАС) у сфері автоматизації об'єктів теплоспоживання [1, с. 1], зокрема систем ОВіК та локальних систем теплопостачання. Дослідження у цій галузі демонструють потенціал МАС щодо підвищення енергоефективності, адаптивності до змінних умов навколишнього середовища та здатності до децентралізованого прийняття рішень. У [2, с. 1] запропоновано агентну архітектуру для децентралізованого керування кондиціонерами. У цьому підході агенти самостійно регулюють положення регулюючих органів, реагуючи на зміни температури в окремих зонах будівлі, що дозволяє ефективно балансувати навантаження та зберігати комфортні умови. Інше дослідження [3, с. 1] присвячено розробці подіє-орієнтованої системи керування HVAC у розумних будівлях з використанням мультиагентної взаємодії. Запропонований підхід дозволяє мінімізувати обмін даними між сенсорами та обчислювальними вузлами, активуючи обчислення лише у відповідь на релевантні події. Аспекти реалізації МАС в умовах обмежених обчислювальних ресурсів також є предметом досліджень [4, с. 1]. Тут описано децентралізовану архітектуру керування ОВіК, орієнтовану на використання у пристроях з малими обчислювальними можливостями, що особливо актуально для IoT-середовищ. Водночас піднімається питання сумісності з промисловими стандартами [5, с. 1], де описано двошарову агентну архітектуру, що відповідає специфікації IEC 61499. Така відповідність дозволяє моделювати поведінку як фізичного, так і кібернетичного шару системи керування у єдиному середовищі, забезпечуючи надійну інтеграцію з промисловою автоматикою.

Значного поширення набувають дослідження, що застосовують у мультиагентних системах методи навчання з підкріпленням. У роботі [6, с. 1] описано систему MARCO, яка реалізує глибоке навчання агентів для оптимізації роботи кондиціонерів та чілерів у великих будівлях. Такий підхід дозволив досягти кращих показників продуктивності та енергоспоживання порівняно з традиційними регуляторами. Комплексний огляд застосування МАС у системах енергоменеджменту будівель наведено в оглядовому дослідженні [1, с. 1], де підкреслено важливість

координації між агентами, що керують різними підсистемами – такими як вентиляція, гаряче водопостачання, відновлювані джерела енергії та накопичувачі – задля досягнення загальної оптимізації енергоспоживання. У роботі [7, с. 1] продемонстровано можливість врахування поведінки користувача в системах керування опаленням за допомогою агентів з глибоким навчанням, що дозволяє гнучко адаптувати режими теплопостачання до реальних умов експлуатації.

Здійснений аналіз сучасних теоретичних та прикладних досліджень свідчить про потенціал мультиагентних систем як архітектурної основи для локальних систем керування. Разом з тим, брак інформації про працюючі на наведених принципах системи керування тепловими пунктами підтверджує доцільність подальших досліджень щодо впровадження мультиагентного підходу у сфері теплопостачання.

Постановка завдання. Метою дослідження є обґрунтування доцільності впровадження мультиагентної архітектури у локальні системи автоматичного керування об'єктами теплопостачання житлового та промислового призначення, зокрема індивідуальними тепловими пунктами, а також демонстрація функціональної декомпозиції технологічного комплексу для відповідності принципам мультиагентного керування.

Виклад основного матеріалу. Методологія дослідження ґрунтується на системному підході до аналізу складних автоматизованих об'єктів, а також на застосуванні концепції моделювання на основі агентів (agent-based modeling, АВМ), яка все частіше використовується у сфері автоматизації систем теплопостачання [1, с. 1; 4, с. 1]. Такий підхід передбачає уявлення складної технічної системи як множини взаємодіючих автономних функціональних елементів (агентів), кожен з яких має власні цілі, правила поведінки, сенсорні входи, засоби керування та механізми комунікації. Застосування принципів функціональної декомпозиції [8, с. 1] дозволяє ідентифікувати ці елементи на основі технологічної структури об'єкта, що забезпечує логічну основу для побудови мультиагентної архітектури.

Для перевірки гіпотези про ефективність мультиагентного підходу проведено структурно-функціональний аналіз двох типових об'єктів – водяного ІТП багатоквартирного житлового будинку та паро-водяного ІТП промислового підприємства. На основі двох відмінних сценаріїв теплопостачання буде показано, як виглядають об'єкти автоматизації у класичному уявленні, готуючи

ґрунт для подальшого переходу до мультиагентної архітектури. У межах аналізу визначено основні контури регулювання, характерні режими роботи та технологічні залежності між окремими функціональними модулями. На основі цього виконано агентну декомпозицію: кожен контур або технологічний модуль розглядається як окремий агент, що виконує певну функцію і взаємодіє з іншими агентами через стандартизовані інтерфейси даних. Визначено базові сценарії взаємодії, що охоплюють як штатні режими роботи, так і нештатні ситуації. Передбачається, що в основі механізмів координації лежать подіє-орієнтовані протоколи, які забезпечують локальне узгодження рішень між агентами та збереження глобальної узгодженості.

Першим ілюстративним об'єктом є тепловий пункт багатоквартирного будинку (рис. 1), який має незалежне підключення до зовнішньої тепломережі через теплообмінники [9]. Уся теплова енергія для опалення та гарячого водопостачання (ГВП) передається від мережі через два окремі теплообмінники – для опалення і для ГВП. Кількість теплоносія первинного контуру для нагріву

води у вторинних контурах регулюється механізованими клапанами, які стоять перед теплообмінниками. У кожному внутрішньому контурі присутня циркуляційна насосна група з двох насосів, які працюють по схемі «основний-резервний». Циркуляційні насоси контуру опалення змінюють свою продуктивність за допомогою частотного перетворювача. Контур опалення має функцію автоматичного підживлювання водою.

Основними контурами керування є: регулювання температури подачі води в систему опалення з корекцією по температурі повітря в навколишньому середовищі, стабілізація перепаду тиску між прямою та зворотною водою системи опалення за допомогою змінної продуктивності циркуляційних насосів, керування насосом і клапаном-соленоїдом підживлювання системи опалення, регулювання температури води на подачі в систему гарячого водопостачання, керування станом циркуляційних насосів системи гарячого водопостачання. Характер навантаження – регулярний, прогнозований. Головна мета автоматизації – забезпечити комфорт мешканців із максимальною енергоефективністю.

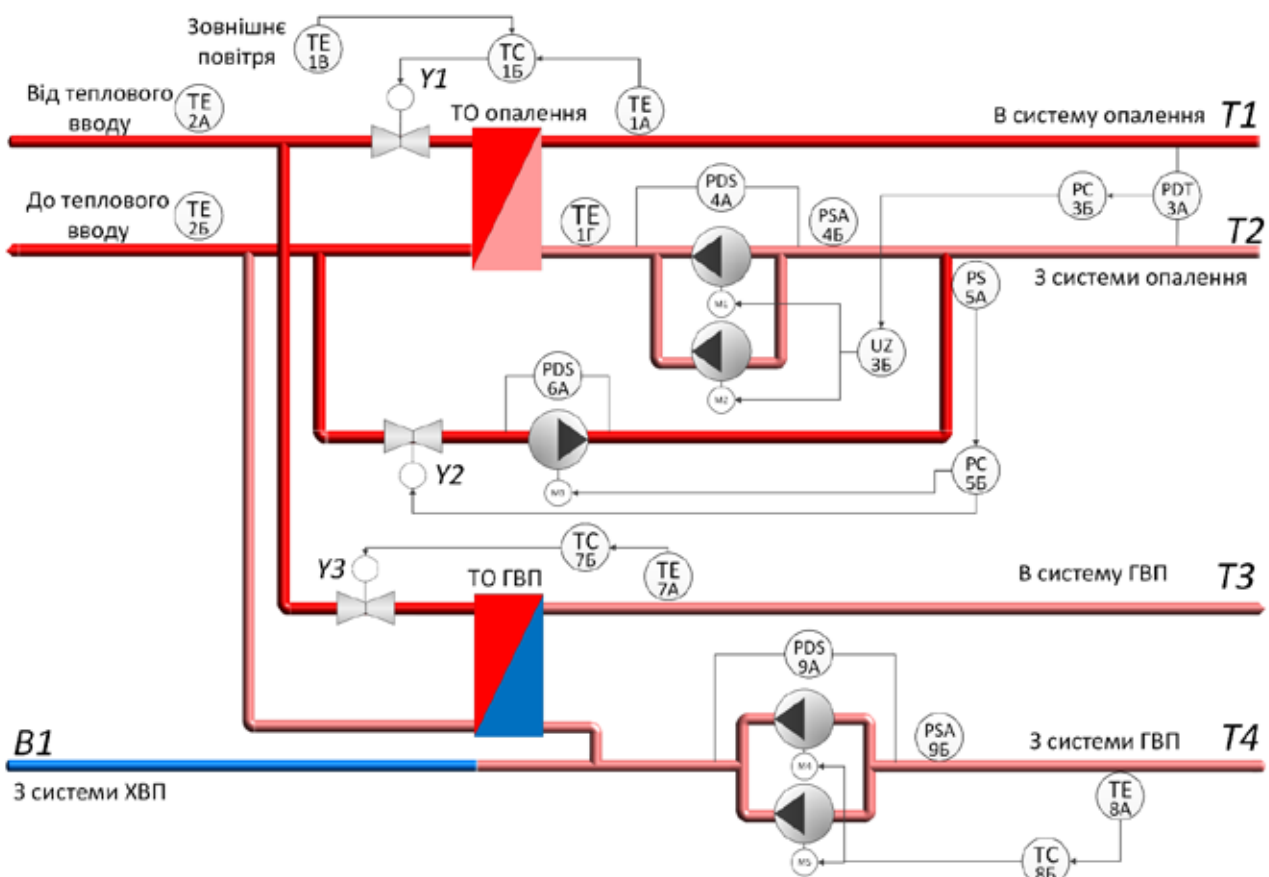


Рис. 1. Схема автоматизації індивідуального теплового пункту житлової будівлі

Пароводяний тепловий пункт [10, с. 54] є частиною технологічної інфраструктури промислового підприємства, яке отримує водяну пару з власної котельні. Тепло передається до опалення та системи ГВП через теплообмінники, а гаряча вода додатково використовується у технологічних процесах, що ускладнює керування. Структурно об'єкт подібний до попереднього, однак у цьому тепловому пункті розміщено бак-акумулятор гарячої води, з якого відбирається гаряча вода для споживачів та на потреби технології. За командою від технології вмикається додатковий циркуляційний насос великої потужності.

Серед контурів керування тут виділено (рис. 2): погодозалежне регулювання температури подачі води в систему опалення, регулювання перепаду тиску між прямою та зворотною водою системи опалення за допомогою змінної продуктивності циркуляційних насосів, керування лінією підживлення системи опалення, регулювання температури води на подачі в бак-акумулятор системи

гарячого водопостачання, регулювання рівня в бак-акумуляторі ГВП, регулювання продуктивності циркуляційних насосів системи гарячого водопостачання та керування додатковим насосом для потреб технологічного устаткування. Характер навантаження – динамічний, зі значним впливом режимів роботи виробничої технології. Ціль автоматизації – забезпечити безперебійне функціонування технології з максимальною енергоефективністю.

Типовим рішенням побудови системи автоматизації є реалізація логіки керування на програмованому логічному контролері. Система має чітко розмежовані контури регулювання. Виконавчі механізми працюють в автоматичному або ручному режимах. Задачі оптимізації (економія енергії, зміна режимів) виконуються через заздалегідь запрограмовані таймери та графіки, які можна сконфігурувати залежно від особливостей конкретного об'єкта.

Аналіз структури об'єктів дослідження дозволив представити кожен з ІТП як множину функціональних модулів з локальною метою керування, обмеженим набором вхідних і вихідних сигналів

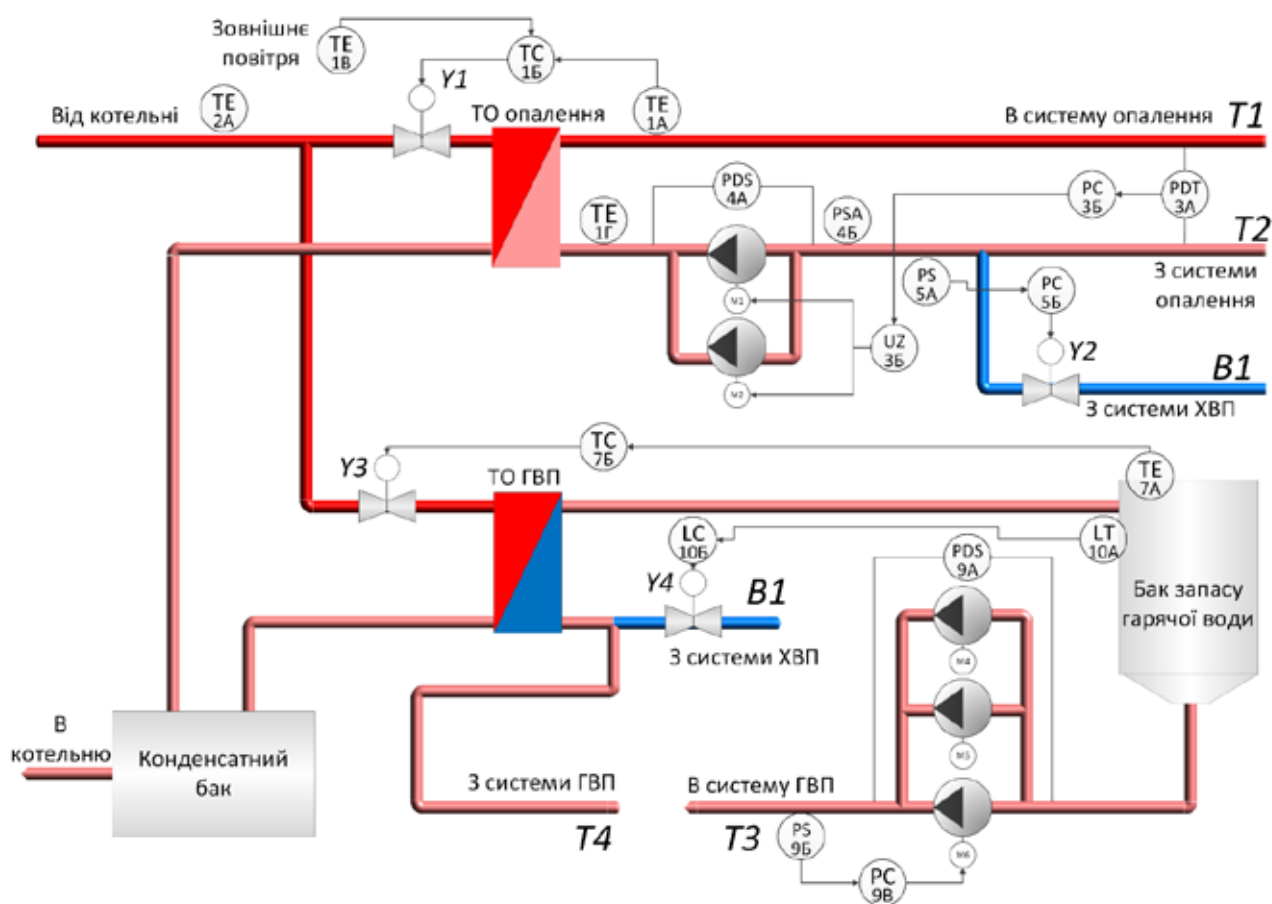


Рис. 2. Схема автоматизації промислового індивідуального теплового пункту

та визначеним інформаційним контекстом взаємодії (таблиці 1 та 2). Така архітектура є придатною до представлення у вигляді мультиагентної системи, в якій кожен контур або підсистема автоматизації функціонує як автономний програмний агент, що приймає рішення на основі локальних даних, але з урахуванням глобального режиму роботи.

На рис. 3 зображено приклад структури взаємодії наведених агентів теплового пункту житлового будинку. Варто відмітити, що направлені зв'язки символізують не стільки ієрархічне підпорядкування, як головний напрям інформаційних потоків у взаємодії агентів між собою. Така архітектура системи потенційно може мати ряд переваг, зокрема: гнучкість – відносно легко додати нові агенти, наприклад, агент розрахунку тарифу; стійкість до збоїв – при виході з ладу одного з агентів, наприклад, оптимізації енерговитрат, інша функціональність не порушується або перебудовується відповідно до обставин; адаптивність – агенти можуть змінювати свою поведінку залежно від сезону, тарифів, історії.

Пароводяний індивідуальний тепловий пункт виробничого підприємства із системою керування, побудованою на основі мультиагентної архітектури, виконує більш складні завдання, тому потребує додаткових агентів (таблиця 2).

Взаємодія агентів зображена у вигляді схеми (рис. 4), в якій окремі програмно-логічні модулі координують спільну діяльність для досягнення локальних показників ефективності та загальної цілі автоматизації.

Для демонстрації працездатності запропонованої мультиагентної архітектури проведено моделювання типових сценаріїв функціонування індивідуальних теплових пунктів у штатних і нештатних умовах. У центрі уваги – механізми взаємодії між агентами, обмін повідомленнями та координація дій на основі локальної інформації. Для кожного сценарію визначено послідовність подій, агенти-ініціатори та агенти-виконавці, а також наслідки для системи в цілому.

Сценарій 1 – «Початковий запуск системи опалення»: Після надходження команди на запуск опалювального сезону, Агент погодозалежного керування активує формування температурної уставки з огляду на поточну температуру навколишнього середовища з урахуванням рекомендацій агентів споживача та оптимізації енерговитрат. Це значення передається агенту температури опалення, який формує команду на відкриття регулюючого клапана в первинному контурі. Одночасно агент насосів ініціює запуск основного насоса з частотним регулюванням і контролює його стан у реальному часі. Агент

Таблиця 1

Агенти теплового пункту багатоквартирного будинку

Агент	Функція	Ціль
Агент температури опалення	Підтримує задану температуру теплоносія у контурі опалення	Мінімізувати відхилення від уставки
Агент погодозалежного керування	Формує уставку температури подачі на основі температури зовнішнього повітря	Забезпечити баланс між комфортом і енергоефективністю
Агент гідравлічного режиму системи опалення	Регулює продуктивність насосної групи для стабілізації перепаду тиску	Забезпечити гідравлічну стійкість, оптимальне енергоспоживання
Агент насосів опалення	Контролює наявність активного насоса, перемикає на резерв у разі аварії або за лічильником мотогодин, періодично вмикає для прокручування при тривалому простоюванні	Забезпечити безперервність роботи, рівномірність зношування
Агент температури гарячого водопостачання	Підтримує температуру гарячої води на подачі в систему ГВП	Підтримувати комфортну температуру ГВП
Агент насосів ГВП	Контролює наявність активного насоса, перемикає на резерв у разі аварії або за лічильником мотогодин, періодично вмикає для прокручування при тривалому простоюванні	Забезпечити безперервність роботи, рівномірність зношування
Агент споживача (будинку)	Інформує систему про стан температури у приміщеннях, рівень комфорту, скарги	Максимізація комфорту мешканців, подання запитів на режим
Агент оптимізації енерговитрат	Виконує аналіз історичних даних і пропонує сценарії енергозбереження	Мінімізувати загальні витрати енергії

Агенти пароводяного індивідуального теплового пункту виробничого підприємства

Агент	Функція	Ціль
Агент постачання пари (джерело)	Контролює витрату пари на об'єкті	Підтримання стабільності тиску пари в котельні, забезпечення пріоритетів
Агент температури опалення	Підтримує задану температуру теплоносія у контурі опалення	Мінімізувати відхилення від уставки
Агент погодозалежного керування	Формує уставку температури подачі на основі температури зовнішнього повітря	Зниження витрат енергії при дотриманні цілей
Агент гідравлічного режиму системи опалення	Регулює продуктивність насосної групи для стабілізації перепаду тиску	Забезпечити циркуляцію та гідравлічну стабільність з урахуванням енергоефективності
Агент насосів опалення	Контролює наявність активного насоса, перемикає на резерв у разі аварії або за лічильником мотогодин, періодично вмикає для прокручування при тривалому простоюванні	Забезпечити безперервність роботи, рівномірність зношування
Агент гарячого водопостачання (бак-акумулятор)	Контролює нагрів води в баку для подачі в систему ГВП	Забезпечення готовності до технологічного споживання
Агент рівня в баку-акумуляторі	Підтримує об'єм води в межах цільового діапазону	Недопущення “сухого ходу” та переповнення
Агент насосів ГВП	Контролює наявність активного насоса, виконує перемикавання за закладеними алгоритмами	Забезпечення своєчасного подання та стабільної подачі
Агент технологічного споживання	Реагує на запити виробництва, керує піковим насосом для потреб технології	Гарантоване постачання ГВП у технологічні цикли
Агент прогнозу навантаження	Формує прогноз потреб у воді та теплі	Підготовка системи до пікових навантажень
Агент оптимізації енерговитрат	Виконує аналіз історичних даних і пропонує сценарії енергозбереження	Мінімізувати загальні витрати енергії

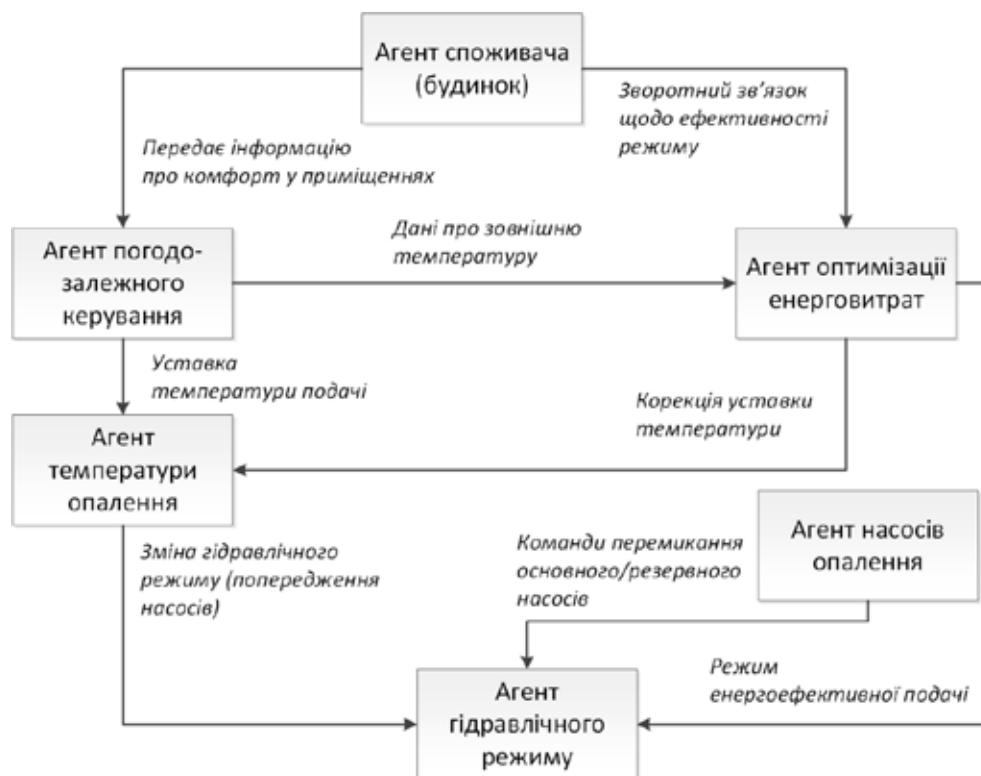


Рис. 3. Структура взаємодії агентів (фрагмент контуру опалення)



Рис. 4. Схема взаємодії агентів промислового ІТП

гідравлічного режиму забезпечує необхідний перепад тиску між подаючим та зворотнім трубопроводами системи опалення для циркуляції теплоносія, впливаючи на продуктивність насоса за допомогою частотного перетворювача.

Сценарій 2 – «Перехід у знижене теплове навантаження вночі», актуальне для споживачів (цехів), в яких люди перебувають не цілодобово. Агент споживача будівлі передає сигнал про зменшення попиту на тепло. Агент формування уставки адаптує температурний графік, після чого нова уставка передається регулятору подачі. Зменшення навантаження фіксується також агентом джерела тепла, який надсилає підтвердження про зниження відбору тепла.

Сценарій 3 – «Аварія основного насоса». Агент насосів отримує аварійний сигнал про зупинку основного насоса та ініціює переключення на резервний агрегат. Тиск в системі стабілізується агентом гідравлічного режиму, а регулятор температури враховує тимчасове зниження теплопередачі. Аварійна подія реєструється та може бути передана на верхній рівень або використана для місцевої діагностики.

Сценарій 4 – «Зниження тиску пари на виході з котельні». Агент постачання пари повідомляє

про зниження тиску пари надмірне сукупне використання пари всіма споживачами. Агент постачання пари ініціює коригування уставок у підпорядкованих агентах (опалення, ГВП), пропонуючи режим енергозбереження. Агент ГВП погоджується на тимчасове незначне зниження температури, узгоджене з агентом технологічного споживання, а агент опалення – на зменшення теплової потужності у нежитлових приміщеннях. Спільна координація дозволяє уникнути аварійного відключення.

Сценарій 5 – «Використання гарячої води з акумулювальної ємності на виробництві». У промисловому ІТП агент технологічного споживання реагує на запити виробництва на подачу гарячої води, беручи до уваги дані агента прогнозу навантаження та передаючи інформацію до агента гарячого водопостачання (бак-акумулятор) та агентів рівня в баку-акумуляторі. Ці агенти забезпечують необхідну кількість гарячої води в потрібний момент часу. Агент насосів активує пікову насосну групу, попередньо перевіривши рівень у ємності через агента рівня. Якщо рівень допустимий – вода подається, а агент ГВП отримує сигнал про зниження температури і ініціює додатковий тепловий вплив через агента прогнозу

навантаження. Агент постачання пари з котельні підтверджує готовність до подачі тепла і встановлює нові обмеження для інших споживачів.

Інші сценарії також можна привести до процедур взаємодій агентів.

Реалізація мультиагентної архітектури локальних систем автоматичного керування ІТП на практиці можлива за рахунок використання сучасних вільнопрограмованих логічних контролерів (ПЛК), протоколів обміну даними та вбудованих можливостей логічної модульності. Особливо доцільною така реалізація є для промислових ПЛК з середовищами розробки, які відповідають принципам стандарту промислового програмування IEC 61131-3, де можна формувати агентоподібні структури завдяки елементам об'єктно-орієнтованого підходу до програмування.

Для реалізації взаємодії між агентами доцільно використовувати легковагі протоколи обміну повідомленнями типу MQTT, які працюють за моделлю взаємодії publish-subscribe. Кожен програмний агент функціонує як окрема логічна одиниця, яка публікує повідомлення про зміни свого стану або результати обробки, а також підписується на канали інших агентів. Це дозволяє формувати подієво-орієнтовану інформаційну шину без централізованого координатора. У випадку реалізації на фізично розподіленій платформі (наприклад, поетапна модернізація окремих частин ІТП), така архітектура дозволяє досягти гнучкості у масштабуванні без потреби реконфігурації всієї системи.

З точки зору практичної реалізації, окремі агенти можуть бути представлені функціональними блоками або модулями з чітко визначеними інтерфейсами обміну даними. Наприклад, кожен агент реалізується як FB-модуль із вхідними параметрами (дані вимірювань, зовнішні команди), внутрішнім станом (логіка прийняття рішень) та вихідними сигналами (керуючі впливи, повідомлення для інших агентів). Обмін між модулями здійснюється через брокер MQTT, реалізований або як окремий компонент на диспетчерському рівні або безпосередньо у контролері за допомогою вбудованих бібліотек.

SCADA-системи, які зберігають свою функцію візуалізації, логування та супервізорного втру-

чання, тут вже не виступають центром прийняття рішень. Вони взаємодіють з агентами через ті ж протоколи обміну (MQTT, OPC UA), отримуючи агреговану інформацію про стан системи та можливість втручання у разі потреби.

Висновки. У роботі було запропоновано концепцію мультиагентної архітектури для локальних систем автоматичного керування об'єктами тепlopостачання на прикладі житлового та промислового індивідуальних теплових пунктів. Продемонстровано, що традиційно централізована логіка ПЛК може бути трансформована у децентралізовану модель із функціонально автономними агентами, які взаємодіють через подієво-орієнтовану інформаційну шину.

Аналіз двох ІТП різного призначення дозволив здійснити функціональну декомпозицію на підсистеми, кожна з яких була представлена як агент з власною ціллю, інтерфейсами взаємодії та механізмом координації з іншими агентами. Формалізація цілей агентів забезпечила основу для побудови логічної моделі їхньої поведінки у штатних та нештатних ситуаціях. Було проілюстровано типові сценарії роботи системи, зокрема адаптацію до змін температури зовнішнього середовища, зміни теплового навантаження, аварійні ситуації та обмеження з боку джерел енергії.

Окрему увагу приділено технічній реалізованості запропонованого підходу. Показано, що мультиагентна архітектура потенційно може бути реалізована на базі сучасних вільнопрограмованих ПЛК із використанням протоколів обміну даними MQTT або OPC UA. Це дозволяє впроваджувати інтелектуальні функції координації та адаптації без необхідності кардинального переоснащення об'єктів.

Перспективи подальших досліджень полягають у розробці прототипів агентних систем для реальних ІТП, верифікації логіки взаємодії на симуляційних моделях, а також у застосуванні методів машинного навчання для вдосконалення стратегій прийняття рішень на рівні окремих агентів. Крім того, подальше узагальнення моделі на більші системи – мережі ІТП або територіально розподілені об'єкти – відкриває можливості інтеграції в концепцію Smart Thermal Grid.

Список літератури:

1. Michailidis P., Michailidis I., Kosmatopoulos E. Review and Evaluation of Multi-Agent Control Applications for Energy Management in Buildings. *Energies*. Вип. 17, № 19. С. 4835. DOI:10.3390/en17194835.
2. Dai M., Li H., Wang S. Multi-agent based distributed cooperative control of air-conditioning systems for building fast demand response. *Journal of Building Engineering*. Вип. 77, 10.2023. С. 107463. DOI:10.1016/j.jobbe.2023.107463

3. Li W., Li H., Wang S. An event-driven multi-agent based distributed optimal control strategy for HVAC systems in IoT-enabled smart buildings. *Automation in Construction*. 2021. Vol. 132. P. 103919. URL: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103919>
4. Su B., Wang S. An agent-based distributed real-time optimal control strategy for building HVAC systems for applications in the context of future IoT-based smart sensor networks. *Applied Energy*. 2020. Вип. 274. С. 115322. DOI:10.1016/j.apenergy.2020.115322
5. Lyu G., Brennan R. W. Multi-agent modelling of cyber-physical systems for IEC 61499-based distributed intelligent automation. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*. 2023. Вип. 38, № 5. С. 596–622. DOI:10.1080/0951192X.2023.2294442
6. Nagarathinam S., Menon V., Vasan A. та ін. MARCO – Multi-Agent Reinforcement learning based Control of building HVAC systems. *Proceedings of the Eleventh ACM International Conference on Future Energy Systems-Energy '20: The Eleventh ACM International Conference on Future Energy Systems*. (Virtual Event Australia, 12.06.2020). Virtual Event Australia : ACM, 2020. DOI:10.1145/3396851.3397694. С. 57–67.
7. McKee E., Du Y., Li F. et al. Deep Reinforcement Learning for Residential HVAC Control with Consideration of Human Occupancy. *2020 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM)2020 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM)*. (Montreal, QC, Canada, 02.08.2020). Montreal, QC, Canada : IEEE, 2020. URL: <https://doi.org/10.1109/PESGM41954.2020.9281893>. P. 1–5.
8. Van Breemen A. J. N., de Vries T. J. A. Design and implementation of a room thermostat using an agent-based approach. *Control Engineering Practice*. 2001. Vol. 9, no. 3. P. 233–248. URL: [https://doi.org/10.1016/S0967-0661\(00\)00111-8](https://doi.org/10.1016/S0967-0661(00)00111-8)
9. Типові рішення по термомодернізації житлових будинків: альбом технічних рішень / за заг. ред. Головатюк-Унгуряну Ю.В.; уклад. Фаренюк Є.Г. Київ : Фонд енергоефективності, 2020. Том 3. 43 с.
10. Степанець О. В., Ущাপовський А. П. Synthesis of automatic control system of industrial steam-water heating unit. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2015. Vol. 3, no. 2(75). P. 54. URL: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.42141>

Zdolnyk M.O., Stepanets O.V. MULTI-AGENT APPROACH TO THE ARCHITECTURE OF LOCAL AUTOMATIC CONTROL SYSTEMS FOR INDUSTRIAL AND RESIDENTIAL HEAT SUPPLY FACILITIES

This article explores the potential for implementing a multi-agent architecture in local automatic control systems for heat supply facilities, particularly individual heating substations (IHS) for residential and industrial applications. It is substantiated that the traditionally used centralized structure of local IHS control systems has limited capacity for adaptation, scalability, and coordination among functional modules, especially under changing external conditions. In view of the needs for digital transformation of thermal infrastructure, a transition to a multi-agent model is proposed, in which each functional block of an IHS operates as an autonomous software agent with a clearly defined function, control objective, and interaction interfaces. The research methodology is based on system analysis of control loops and the principles of functional decomposition. To justify the architectural approach, the structures of two typical facilities are analyzed: a water-based IHS for a multi-apartment residential building and a steam-water IHS for an industrial enterprise. For each facility, agent-based decomposition is performed, with functions, objectives, and interaction scenarios defined for each agent. Information exchange graphs between agents are constructed, and examples of system behavior in various modes—ranging from normal startup to emergency events or changes in demand—are developed. A conceptual technical solution for implementing the multi-agent model using modern industrial automation tools is proposed. The results demonstrate that adopting a multi-agent architecture ensures adaptability and flexibility of control systems while preserving regulatory loops as fundamental control mechanisms. The advantages of such an architecture, particularly its scalability and potential for integration with distributed information platforms, are identified. Future research prospects include the development of agent system prototypes for real IHS, the application of machine learning to enhance decision-making efficiency, and the expansion of the model to the level of thermal networks within the Smart Thermal Grid concept.

Key words: process automation, multi-agent control systems, heating substation, decentralized control, digital transformation.