DOI: 10.20998/EREE.2024.2(9).317625

УДК 681.518:004.942

НОЗДРЕНКОВ ВАЛЕРІЙ СТАНІСЛАВОВИЧ ✉ – кандидат технічних наук, доцент, докторант кафедри комп'ютерних наук та системного аналізу, Черкаський державний технологічний університет; м. Черкаси, Україна; ORCID: https://orcid.org/0009-0002-0579-6821; e-mail: v.s.nozdrenkov.d24@chdtu.edu.ua.

ПАВЛОВ АНДРІЙ ВОЛОДИМИРОВИЧ – кандидат фізико-математичних наук, доцент, доцент кафедри комп'ютеризованих систем управління, Сумський державний університет, м. Суми, Україна; ORCID: https://orcid.org/0009-0002-8861-8472; e-mail: a.pavlov@ksu.sumdu.edu.ua.

ОЛЕКСІЄНКО ГАЛИНА АНДРІЇВНА – кандидат фізико-математичних наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерних наук, Сумський державний університет, м. Суми, Україна; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0274-5095; e-mail: galyana2@ukr.net.

ЖУРАВЛЬОВ ОЛЕКСАНДР ЮРІЙОВИЧ – кандидат технічних наук, доцент, старший викладач кафедри комп'ютеризованих систем управління, Сумський державний університет, м. Суми, Україна; ORCID: https://orcid.org/0009-0002-7834-6661; e-mail: san.75@i.ua.

ЖУРАВЛЬОВ ЮРІЙ ОЛЕКСАНДРОВИЧ – інженер-програміст, ТОВ «НЕТКРЕКЕР», м. Суми, Україна; ORCID: https://orcid.org/0009-0008-2369-198X; e-mail: nagatoura@gmail.com.

ПРОГНОЗОВАНЕ УПРАВЛІННЯ СИСТЕМОЮ ОПАЛЕННЯ З ВИКОРИСТАННЯМ IOT ТА ПРЕДИКТИВНОЇ АНАЛІТИКИ

У статті розглядаються принципи та методи прогнозованого управління системами опалення з використанням технологій Інтернету речей (IoT) та предиктивної аналітики. Представлено модель керування процесом нагрівання приміщення, яка враховує теплові втрати та використовує алгоритми регулювання, що базуються на прогнозуванні зовнішньої температури. Основою моделі є інтеграція даних від IoT-датчиків і хмарного сервісу OpenWeatherMap, що дозволяє формувати коригувальний сигнал для оптимізації енергоспоживання та забезпечення стабільності температури. Запропоновано підхід до адаптації традиційних регуляторів (ПІ/ПІД) для дискретного режиму роботи котла, що гарантує якість перехідних процесів без перерегулювань і значних температурних коливань. У роботі детально описано реалізацію моделі в середовищі MATLAB Simulink, а також програмну інтеграцію через платформу Node-RED із використанням протоколу ModBus TCP. Крім того, досліджено ефективність розподіленої архітектури типу «сервер–виконуючий пристрій», яка забезпечує зручну інтеграцію IoT-систем із зовнішніми сервісами. Результати моделювання підтверджують, що врахування прогнозованих змін зовнішньої температури дозволяє суттєво знизити витрати енергії, зберігаючи тепловий комфорт і стабільність системи. Запропонована методика демонструє потенціал впровадження енергоефективних рішень для автоматизації управління кліматом у приміщеннях, а також перспективи подальшого використання IoT-технологій у цьому напрямку.

Ключові слова: інтернет речей (IoT), предиктивна аналітика, управління опаленням, теплові втрати, прогнозування температури, ПІ/ПІД-регулятор, енергоефективність, автоматизація технологічних процесів, хмарні сервіси, OpenWeatherMap, Node-RED, ModBus TCP протокол, MATLAB Simulink, дискретний режим управління, кліматичні системи.

Вступ. Сучасний розвиток технологій автоматизації та інформаційних систем значно підвищив вимоги до ефективності, адаптивності та економічності систем управління. Особливу роль у цьому контексті відіграють Інтернет речей (IoT) і технології предиктивної аналітики, які відкривають нові можливості для енергозбереження та оптимізації роботи складних інженерних систем. Зокрема, системи опалення, що є основними споживачами енергоресурсів у житлових і промислових приміщеннях, потребують впровадження інноваційних підходів для підвищення їх ефективності та зниження витрат енергії.

Раціональне використання енергоресурсів є одним із ключових завдань сучасних систем автоматизації. Інтелектуальні IoT-рішення дозволяють інтегрувати дані від датчиків, хмарних сервісів і аналітичних систем для створення прогнозованих керуючих сигналів. Це не лише оптимізує процес опалення, але й сприяє стабільності температурного режиму за рахунок врахування майбутніх змін зовнішніх умов.

Окреме місце займає проблема забезпечення низької собівартості як компонентів, так і системи в цілому, адже в багатьох випадках доступність таких рішень стає визначальним фактором для їх впровадження. IoT, як основа інтелектуальної автоматизації, дозволяє значно знизити витрати на розробку і підтримку систем, інтегруючи існуючі сервіси для збору і обробки даних. Це відкриває перспективи для розвитку енергоефективних систем у різних сферах – від житлових приміщень до промислових об'єктів.

У роботі основна увага приділена розробці моделі управління процесом опалення приміщень, що враховує теплові втрати, дискретний режим роботи котла та прогнозування зовнішньої температури на основі даних сервісу OpenWeatherMap. Особливістю запропонованого підходу є адаптація класичних алгоритмів регулювання (ПІ/ПІД) для дискретної реалізації, що дозволяє досягти високої якості перехідних процесів без перерегулювань і значних температурних коливань.

Запропонована методика забезпечує енергоефективність, масштабованість і надійність архітектури типу «сервер–виконуючий пристрій», що робить її перспективною для використання у системах управління мікрокліматом у житлових, офісних та

© В. С. Ноздренков, А. В. Павлов, Г. А. Олексієнко, О. Ю. Журавльов, Ю. О. Журавльов, 2024

Ця робота ліцензується відповідно до ***Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)***

Конфлікт інтересів: Автори заявили про відсутність конфлікту

промислових об'єктах. Впровадження таких рішень відповідає сучасним трендам у галузі енергозбереження та автоматизації.

Мета статті. Метою статті є розробка та дослідження методики прогнозованого управління системами опалення з використанням технологій IoT та предиктивної аналітики. Основні акценти зроблено на створенні моделі, яка враховує теплові втрати, особливості дискретного режиму роботи котла та алгоритмів регулювання на основі прогнозування зовнішньої температури.

Завданнями, які вирішуються в рамках дослідження, є:

- Аналіз сучасних тенденцій та технологій в області управління системами опалення.
- Розробка моделі керування, що інтегрує дані від IoT-датчиків та хмарних сервісів для створення коригувальних сигналів.
- Адаптація класичних ПІ/ПІД регуляторів для дискретного режиму роботи.
- Впровадження методів прогнозування зовнішньої температури для оптимізації енергоспоживання та забезпечення стабільності температурного режиму.
- Реалізація програмної інтеграції моделі через платформу Node-RED із використанням протоколу ModBus TCP.

Стаття спрямована на підвищення енергоефективності систем опалення, зменшення витрат енергоресурсів та забезпечення стабільного кліматичного комфорту в приміщеннях. Запропонований підхід також відкриває перспективи для широкого впровадження інноваційних IoT-рішень у галузі автоматизації управління кліматом.

1. Огляд літературних джерел. Проблема енергозбереження та ресурсозбереження останніми роками стала одним із ключових завдань для розробників систем управління. Системи опалення та опалювальні прилади є одними з основних споживачів енергоресурсів, тому від їхньої ефективної роботи безпосередньо залежить питання економного та ефективного використання енергії.

Для вирішення поставлених завдань розробники все частіше вдаються до створення інтелектуальних систем керування з використанням IoT.

Багато публікацій присвячено опису систем керування мікрокліматом приміщень на основі IoT.

Так, у статті [1] описана система управління кондиціонером з використанням Інтернету речей, що включає лічильник, шлюз, модулі хмарних обчислень. Використовуючи результати аналізу та сигналів роботи обладнання, хмара генерує рішення для ефективного локального управління виконавчими механізмами.

Аналогічна система управління розглянута у статті [2], де показано ефективність її застосування для опалення, вентиляції та кондиціювання повітря у приміщенні.

Структура платформи, що поєднує новітні платформи Інтернету речей та масиву даних з алгоритмами машинного навчання та програмами управління моделями з прогнозуванням на базі MATLAB для управління вентиляцією будівель представлена в роботі [3]. Результати досліджень показали зниження енергоспоживання системою вентиляції приблизно на 16 %.

Найчастіше для створення систем керування нагріванням приміщень використовуються відносно недорогі засоби автоматизації, в результаті вартість самої системи виходить досить низькою. У роботі [4] описано розроблений термостат з урахуванням Інтернету речей. Для створення автор використовував мікроконтролери Arduino, пов'язані між собою через модулі nRF24L01, датчики температури DHT22 та ESP8266 для Інтернету.

Використанню технології Інтернету речей для контролю та моніторингу температури у теплиці присвячена стаття [5]. Тут описана енергоефективна система, що масштабується для моніторингу температури навколишнього середовища і контролю температури всередині приміщення на основі моделі мереж Петрі, здатна обробляти великі обсяги даних, що приймаються від датчиків, з використанням моделі даних динамічного графа.

Особливе місце у публікаціях присвячене прогнозованому управлінню опалювальними приладами для підтримки температури в приміщенні, а отже – прогнозованому споживанню енергоресурсів.

У недавньому минулому було проведено велику кількість досліджень щодо зниження енергоспоживання за допомогою Інтернету речей та прогнозування енергоспоживання (IoT-ECP). [6]

У роботі [6] показано, що багато досліджень у цій галузі використовують лише короткострокове прогнозування навантаження і є необхідність у розширенні досліджень з метою охопити більш довгострокові часові рамки.

Огляду передових стратегій управління споживанням електроенергії та їхнього впливу на будівлі та технічні системи з погляду економії енергії та витрат присвячена стаття [7]. Тут показано, що стратегії мають бути прогнозуючими та адаптуючими до зміни температур довкілля.

У статті [8] описано значення Інтернету речей для ефективного управління енергоспоживанням. Розроблено моделі рекурентної нейронної мережі Елмана та експоненційної для прогнозування споживання електроенергії, керованої IoT. Моделі здатні прогнозувати споживання електроенергії на підставі прогнозних даних температури навколишнього середовища, що призводить до мінімізації втрат електроенергії, економії коштів.

Так, у роботі [9] розроблено платформу масиву даних на основі IoT з метою прогнозування потреб будівель на день вперед. За допомогою кластерного аналізу визначаються закономірності добового профілю погоди, які поряд із показаннями датчиків IoT, специфікою роботи будівлі використовуються для навчання прогностичних моделей. Авторами встановлено, що в результаті використання датчиків IoT загальна точність прогнозування може бути покращена.

У статті [10] наведено інноваційне дослідження передиктивного управління енергоспоживанням будівлі в рамках чотирьохрівневої архітектури Інтернету речей. Представлено дві стратегії, що базуються на побудові прогностичних моделей з використанням алгоритмів дерева регресії та бустингу найменших квадратів.

Для вирішення проблеми температурного дисбалансу в системах опалення будівель у статті [11] запропоновано стратегію управління, яка базується на прогнозуванні та коригуванні навантаження відповідно до температури приміщення. Рівень економії енергії при цьому становив близько 6,75 %.

Цій же тематиці присвячено роботу [12], де запропоновано використовувати онлайн-машину послідовного екстремального навчання для прогнозування температури подачі теплоносія, лінійну модель для прогнозування температури в приміщенні, і як результат – встановлення інтегрованої стратегії регулювання температури теплоносія. Результати досліджень показали, що індекс ефективності роботи, що виконується з використанням стратегії регулювання, запропонованої у даній статті, на 9,31 %, 16,33 % і 20,87 % вище, ніж використання цієї стратегії.

Удосконалена практична система предиктивного управління на основі моделі для забезпечення теплового балансу, яка включає прогнозну модель множинної лінійної регресії та інноваційний нечіткий контролер, який враховує індекс прогнозованого середнього значення та умови зовнішнього середовища, описана в статті [13]. На думку авторів, це рішення здатне оптимізувати умови теплового комфорту в різні пори року і перевершує традиційні підходи щодо продуктивності.

Контролер теплового комфорту на основі прогнозного управління моделлю, інтегрований в існуючу систему енергоефективного управління тепловим комфортом, який також використовує індекс прогнозованого середнього значення підвищення енергоефективності і теплового комфорту, представлений в [14].

Модель оцінки для більш обґрунтованого прогнозування теплового навантаження для інтелектуальної системи централізованого теплопостачання, яка базується на просторово-часовій гібридній згортковій нейронній мережі з довгостроковим і короткостроковим запам’ятовуючим пристроєм представлена в [15]. В результаті проведених експериментів автори статті стверджують, що використання цієї моделі мають очевидні переваги точності прогнозування теплового навантаження.

Методологія використання моделі сірого ящика з метою оцінки теплової динаміки у приміщеннях на основі фільтра Калмана та стану теплової мережі представлена в [16]. Зважаючи на відсутність реальних даних, отриманих за допомогою IoT, набір даних був створений за допомогою програмного забезпечення Energy + з посиланням на реальні моделі будівель. Результати демонструють точність даної методології у прогнозуванні зміни температури у приміщенні протягом наступної доби з максимальною помилкою менше 2°C з урахуванням даних за рік з різними погодними умовами.

Механізм управління завданнями IoT, який базується на передиктивній оптимізації з метою мінімізації споживання енергії в будинках представлений у [17]. Він включає модуль передиктивної оптимізації на підставі прогнозування і модуль оптимізації для вирішення завдань мінімізації споживання енергії. Автори, на основі проведених досліджень, стверджують, що даний механізм працює краще, ніж окремо взяті механізми прогнозування та оптимізації.

Прикладну методику швидкого переходу від заздалегідь оптимізованого опорного алгоритму управління до його дискретизованого (програмного) аналога для потреб дискретного управління об’єктами, що працюють за принципом on-off, наведена в роботі [18]. Ця методика може бути корисною при проектуванні та реалізації бюджетних систем автоматичного управління, зокрема, на основі єдиної інформаційно-керуючої мережі за клієнт-серверним принципом.

Враховуючи вищевикладене можна зробити висновок, що завдання синтезу системи регулювання, використовуючи IoT, з урахуванням прогнозування даних є актуальною і потребує подальших досліджень.

2. Моделювання процесу керування системою опалення. Для моделювання процесу керування опаленням приміщення та аналізу ключових параметрів в середовищі MATLAB біла реалізована схема, наведена на рис. 1.

Як видно з рисунку, відповідна модель включає в себе наступні підсистеми:

- підсистема приміщення («ROOM»);
- підсистема опорного алгоритму керування («PID(s)»);
- підсистема програмної адаптації опорного алгоритму для дискретного режиму роботи котла («Soft adaptation for discrete mode»);
- підсистема коригування типового алгоритму керування за рахунок предикції значень температури зовнішнього до приміщення середовища («Predict Subsystem»);
- підсистема врахування теплових втрат («Heat loses»).

Для візуалізації результатів моделювання та більш зручного їх аналізу використані наступні блоки:

- результуюче значення температури в приміщенні («Temperature»);
- значення витраченої теплової енергії («Heat»);
- графіки перехідних процесів за ключовими параметрами («Modeling results»);
- графік адаптаційної характеристики для використання на рівні кода IoT-модуля або при налаштуванні сервера Node-Red («Adaptive characteristic»).

Приклади результатів моделювання наведені на рис. 2 та рис.3.

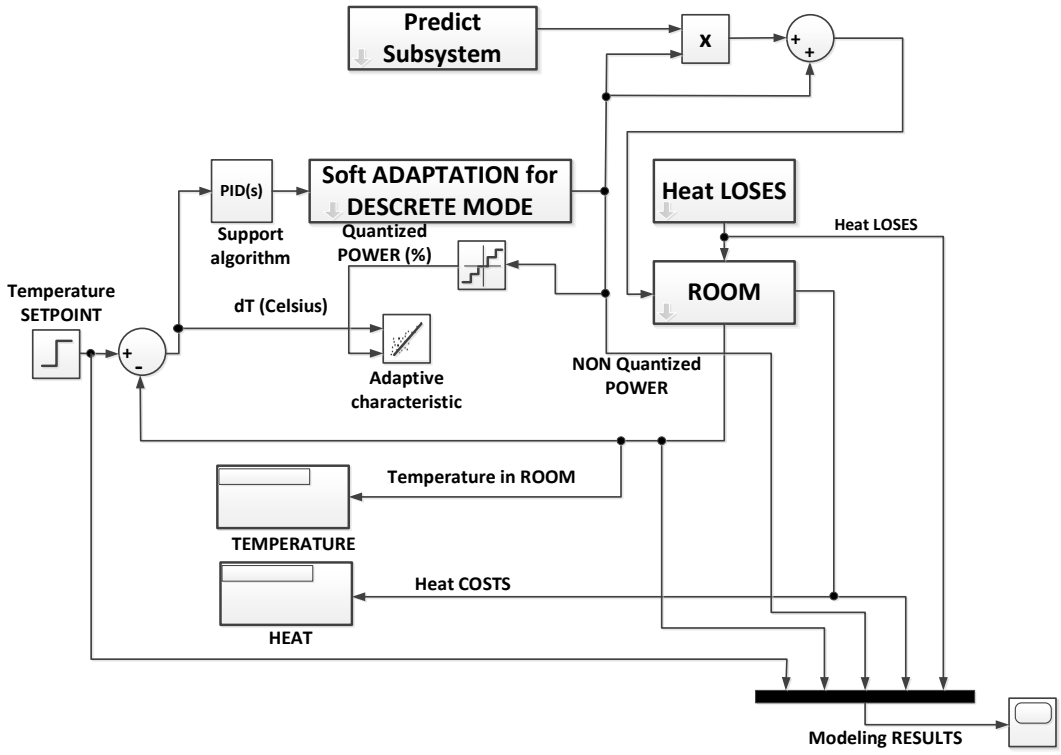

Рисунок 1 – Схема для моделювання процесу керування опаленням приміщення в середовищі MATLAB

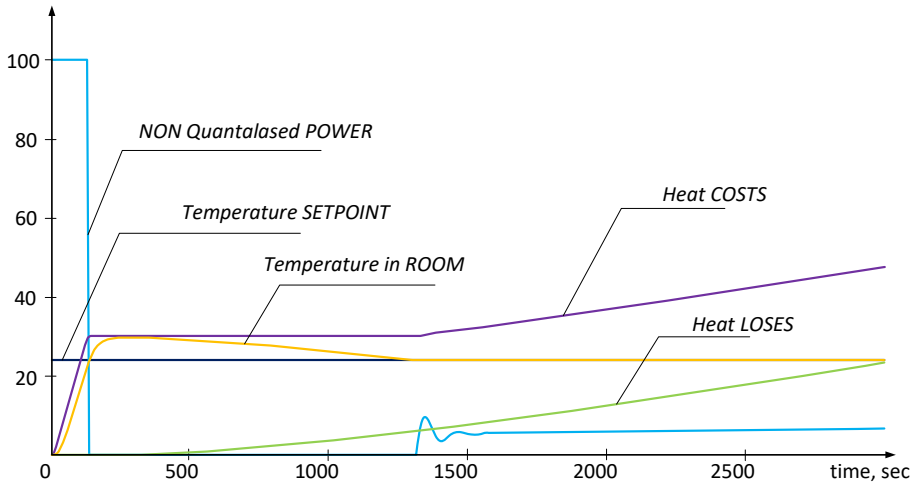

Рисунок 2 – Приклад перехідних процесів в системі при використанні у якості опорного алгоритму керування ПІД-регулятора з параметрами P = 12, I = 12, D = 0.1, N = 200

2.1 Моделювання ключових підсистем управління опаленням. З урахуванням аспектів, вказаних при формалізації приміщення як об'єкта керування, наведено приклади реалізації ключових підсистем моделювання. Кожна підсистема має свою роль у забезпеченні стабільного, точного та енергоефективного керування процесом нагрівання приміщення. Загальна структура системи керування опаленням охоплює вимірювання та збір даних від різних сенсорів, аналіз отриманої інформації, реалізацію алгоритмів ПІД-регулювання, забезпечення дискретного режиму роботи котла, прогнозування навантаження і постійний контроль енергоефективності. Такі сенсори фіксують температуру, вологість та інші параметри, а результати вимірювань проходять цифрову обробку і фільтрацію. ПІД-регулятор із заданими значеннями параметрів P = 12, I = 12, D = 0.1 і N =200 реагує на відхилення реальної температури від установленого рівня, забезпечуючи швидку стабілізацію та уникаючи різких стрибків (рис. 3).

Дискретний режим роботи котла реалізується через вмикання і вимикання теплоносія в оптимальні часові інтервали, що дає змогу економити енергію та утримувати бажану температуру. Важливу роль відіграє прогнозування теплового навантаження з урахуванням теплоємності конструкцій і факторів довкілля, щоб забезпечити комфорт за мінімальних витрат ресурсу. Система додатково оснащується механізмами моніторингу та оповіщення, завдяки яким

оператор може стежити за станом усіх компонентів та оперативно реагувати на критичні відхилення. У прикладі, представленому на рис. 3, наведено адаптаційну характеристику дискретного режиму роботи котла, яка демонструє, як обираються робочі цикли залежно від поточної температури та умов у приміщенні. Такий підхід дає змогу точно регулювати споживання енергії й одночасно підтримувати стабільне теплове середовище, а налаштування регулятора коригуються залежно від фактичної поведінки системи, що підвищує її гнучкість та енергоефективність.

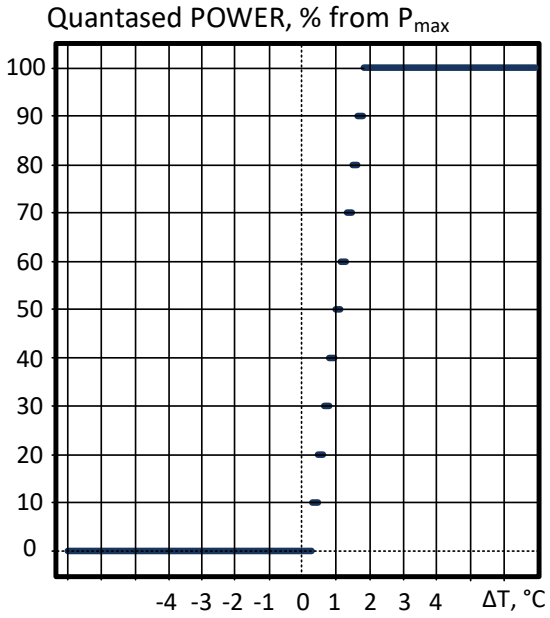

Рисунок 3 – Приклад адаптаційної характеристики для дискретного режиму роботи котла при використанні у якості опорного алгоритму керування ПІД-регулятора з параметрами P=12, I=12, D=0.1, N=200.

Рис. 4 демонструє реалізацію підсистеми програмної адаптації опорного алгоритму для дискретного режиму роботи нагрівача («Soft adaptation for discrete mode»). Ця підсистема забезпечує конвертацію безперервних сигналів, які генерує базовий регулятор, у дискретні керуючі команди для виконавчих пристроїв. Такий підхід дозволяє ефективно керувати нагрівачами, що працюють у режимі «On/Off». Зокрема, використання адаптаційної характеристики мінімізує перерегулювання, стабілізує роботу системи та зменшує витрати енергоресурсів. Вона враховує затримки між ввімкненням нагрівача і зміною температури, що дозволяє уникнути надлишкової роботи обладнання.

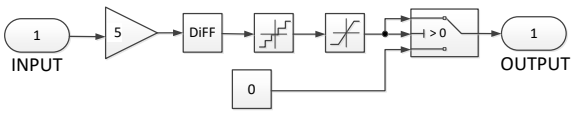

Рисунок 4 – Приклад реалізації підсистеми програмної адаптації опорного алгоритму для дискретного режиму роботи нагрівача («Soft adaptation for discrete mode»)

Рис. 5 представляє підсистему моделювання приміщення («ROOM»), яка є центральним елементом загальної моделі. Вона враховує характеристики теплоємності та тепловтрат приміщення, а також зовнішні впливи, такі як зміна температури повітря і сонячне випромінювання. Ця підсистема дозволяє оцінити, як швидко приміщення може нагрітися або охолодитися за різних умов, і дає змогу протестувати різні стратегії керування без реальних експериментів. Вона також моделює взаємодію системи опалення з такими елементами, як вікна, стіни й вентиляція.

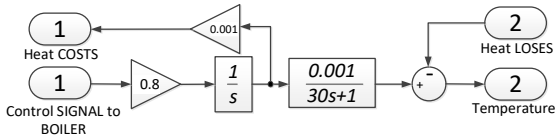

Рисунок 5 – Приклад реалізації підсистеми приміщення («ROOM»)

Рис. 6 показує підсистему врахування теплових втрат («Heat loses»). Ця частина моделі є критично важливою, оскільки тепловтрати впливають на загальну ефективність системи. У моделі враховуються такі фактори, як якість теплоізоляції, площа поверхонь, через які відбувається теплообмін, а також різниця між внутрішньою і зовнішньою температурами. Завдяки цій підсистемі можна оптимізувати потужність нагрівача, запобігти надмірному нагріванню та знизити витрати енергії.

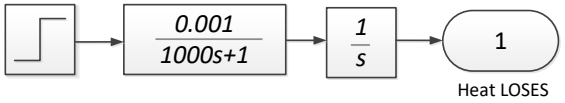

Рисунок 6 – Приклад реалізації підсистеми врахування теплових втрат («Heat loses»)

Рис 7. ілюструє підсистему коригування типового алгоритму керування на основі прогнозу зовнішньої температури («Predict Subsystem»). Цей модуль інтегрує дані прогнозів погоди, отримані через API таких сервісів, як OpenWeatherMap, у процес управління. Він розраховує необхідні коригувальні зміни до базових параметрів керування, щоб компенсувати очікувані зміни в зовнішніх умовах. Наприклад, якщо прогнозується значне зниження температури, підсистема заздалегідь збільшує потужність опалення, щоб уникнути різкого падіння температури в приміщенні. Це дозволяє підтримувати стабільний клімат із мінімальними витратами енергії.

Крім того, реалізація цих підсистем у середовищі MATLAB Simulink дозволяє проводити симуляції різних сценаріїв і тестувати нові стратегії керування до їх впровадження в реальних умовах. Усі підсистеми розроблені так, щоб забезпечити взаємодію між собою в рамках єдиної архітектури системи керування.

Таким чином, комплексний підхід до моделювання із врахуванням теплових втрат, прогнозування та дискретного режиму роботи забезпечує високу ефективність і надійність системи опалення. Це дозволяє знизити експлуатаційні витрати,

підвищити комфорт користувачів і зменшити вплив на навколишнє середовище.

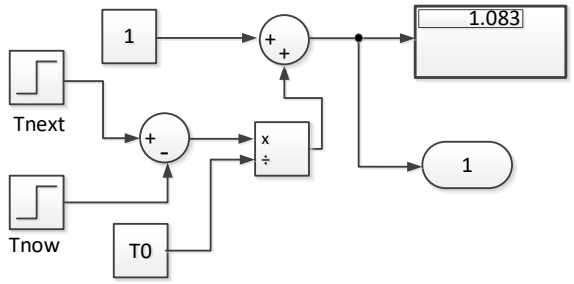

Рисунок 7 – Приклад реалізації підсистеми коригування типового алгоритму керування за рахунок предикції значень температури зовнішнього до приміщення середовища («Predict Subsystem»)

2.2 Аналіз результатів моделювання. На основі розробленої моделі та методики було проведено серію аналітичних експериментів у середовищі MATLAB Simulink. У даній роботі представлені результати, які безпосередньо ілюструють основні принципи, реалізовані під час створення моделі процесу нагрівання приміщення та керування з урахуванням теплових втрат. Особлива увага приділена методиці врахування предикції температури навколишнього середовища на основі даних зовнішнього хмарного погодного сервісу OpenWeatherMap. Важливим аспектом є те, що адаптаційна характеристика залишалася незмінною при переведенні базового алгоритму керування в дискретний режим для пристроїв, які працюють за схемою «On/Off».

Практична частина роботи дозволила зробити такі висновки:

- **Стійкість перехідного процесу.** Використання ПІ або ПІД закону регулювання, доповненого предикційною складовою, у типовому алгоритмі керування забезпечує стійкий перехідний процес температури навіть у дискретному режимі роботи котла.
- **Якість регулювання.** Показники перехідного процесу відповідають загальноприйнятим нормам, зокрема перерегулювання становить менше 1%; Коливальність системи є вкрай низькою, що дозволяє наблизити перехідний процес до аперіодичного другого порядку. Аналогічні результати спостерігаються при використанні контурів регулювання з передатними функціями, подібними до фільтрів Баттерворта другого порядку.
- **Енергоефективність**. Використання предикції дозволяє суттєво знизити витрати газу для опалення приміщення, не погіршуючи якість перехідного процесу та стійкість системи. Це досягається за рахунок врахування прогнозованих змін температури навколишнього середовища разом із пропорційно-інтегральним або пропорційно-інтегрально-диференційним законами регулювання. У результаті запобігається формування великих температурних градієнтів, особливо під час розігріву приміщення.
- **Простота впровадження**. Використання адаптаційної характеристики значно полегшує процес налаштування та розгортання алгоритму керування в серверній частині системи. Це спрощує інтеграцію та експлуатацію системи в реальних умовах.
- **Зручність архітектури**. Представлена архітектура системи керування типу «сервер – виконуючий пристрій» із зворотним зв’язком на основі спільної інформаційно-керуючої мережі підтвердила свою ефективність і зручність. Для забезпечення високого рівня достовірності передачі даних рекомендується використовувати промислові протоколи, такі як ModBus TCP.

Проведені моделювання підтвердили, що розроблена модель та методика є ефективним підходом до прогнозованого управління системою опалення. Вони забезпечують стабільну роботу, знижують енергоспоживання та є перспективними для впровадження в інтелектуальних системах автоматизації.

3. Програмування IoT-модуля. Розробка та впровадження IoT-модуля є критично важливими етапами для реалізації ефективної системи керування процесами опалення. Нижче наведено детальний опис серверної частини, її функціональних складових та підсистем, які забезпечують інтеграцію IoT-модуля в загальну архітектуру системи.

3.1 Серверна частина. Для реалізації алгоритмів керування, отриманих у процесі моделювання, було обрано серверний підхід. Сервер розміщується в локальній інформаційно-керуючій мережі, що забезпечує централізовану обробку даних і передавання команд IoT-модулю. Така структура має низку переваг:

- **Високі обчислювальні можливості.** Сервер здатний обробляти значні обсяги даних та використовувати складні аналітичні алгоритми.
- **Інтеграція хмарних обчислень**. Використання хмарних і туманних обчислень дозволяє підвищити точність та якість процесу керування.
- **Гнучкість і адаптивність**. Сервер може оперативно коригувати уставки та використовувати актуальні дані з зовнішніх сервісів, наприклад, прогнозу погоди.
- **Масштабованість**. Інтеграція з екосистемою IoT дозволяє легко додавати нові пристрої або функції.

Передавання параметрів керування здійснюється через промисловий протокол ModBus TCP, що забезпечує високу надійність і точність. Для налаштування та візуалізації процесів використовується середовище Node-RED, яке підтримує гнучке програмування завдяки більш ніж 250 тисячам додаткових бібліотек. Проведені тести підтвердили універсальність Node-RED для роботи на різних платформах, включаючи Windows, Linux, Android та Raspbian.

3.2 Керуюча складова серверної частини. Серверна частина містить спеціалізований потік даних, що опрацьовує змінні протоколу ModBus TCP – «Temperature CHANNEL», показана на рис. 8.

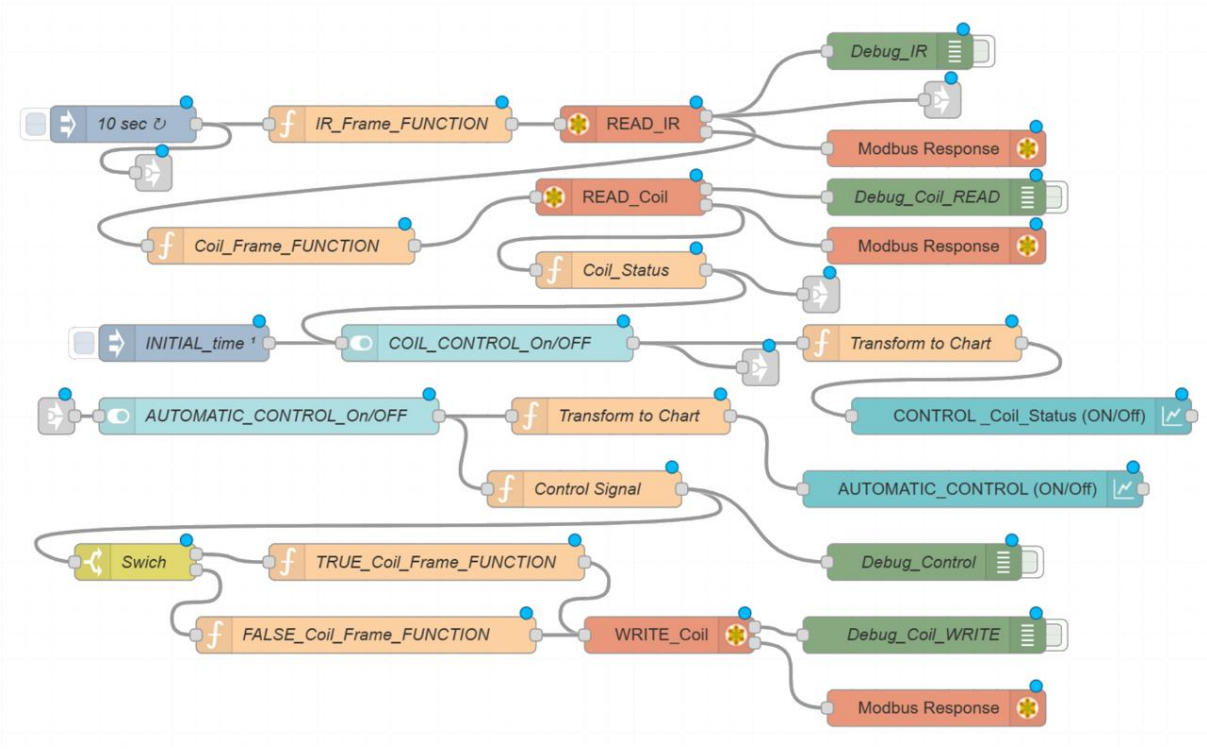

Рисунок 8 – Програма реалізації потоку «Temperature CHANEL»

Цей потік реалізує такі функції:

- Зчитування фактичного значення температури у приміщенні (формат Input Register).
- Обробка керуючих сигналів у дискретному режимі роботи (формат Coil).
- Формування даних для людино-машинного інтерфейсу (HMI) з можливістю тонкого налаштування.

3.3 Алгоритм керування. Основний алгоритм керування, програмна реалізація якого представлена на рис. 9, винесено в окремий інформаційний потік – «CONTROL», показаний на рис. 10. Така сегментація дозволяє:

- Полегшити програмування і тестування.
- Забезпечити незалежність окремих частин системи.
- Уникнути конфліктів даних між підсистемами.

```
var dT = msg.payload;
var P = 0;
if (dT < 0.5) { P = 0; }
if (dT >= 0.5 && dT < 1.5) { P = 1; }
if (dT >= 1.5 && dT < 2.5) { P = 2; }
if (dT >= 2.5 && dT < 3.5) { P = 3; }
if (dT >= 3.5 && dT < 4.5) { P = 4; }
if (dT >= 4.5 && dT < 5.5) { P = 5; }
if (dT >= 5.5 && dT < 6.5) { P = 6; }
if (dT >= 6.5 && dT < 7.5) { P = 7; }
if (dT >= 7.5 && dT < 8.5) { P = 8; }
if (dT >= 8.5) { P = 9; }
return { power: P };
```

Рисунок 9 – Програма реалізація вузла «Algorithm»

Адаптаційна характеристика, розроблена під час моделювання, реалізована в програмному вигляді за допомогою JavaScript у вузлі «Algorithm». Це дозволяє легко інтегрувати її в серверну частину та пристрої, що працюють у дискретному режимі. Використання таких характеристик значно спрощує налаштування алгоритму керування.

3.4 Предикційна складова. Для реалізації функцій прогнозування використовується окремий інформаційний потік «OpenWeatherMap_predict». Ця підсистема виконує такі задачі:

- Відправка GET-запиту до сервісу OpenWeatherMap для отримання прогнозів погоди. Наприклад для Черкас необхідно виконати запит (в даному випадку Черкаси, id=710791): *https://api.openweathermap.org/data/2.5/forecast?id=710791&appid=YOUR_API_KEY*
- Парсинг отриманих JSON-даних та обчислення необхідних значень для коригування сигналів.
- Інтеграція прогнозних даних у процес керування.
- Програмна реалізація методу предикції представлена на рис. 11. Вона дозволяє враховувати майбутні зміни температури зовнішнього середовища, що забезпечує стабільну роботу системи опалення з мінімальним енергоспоживанням.

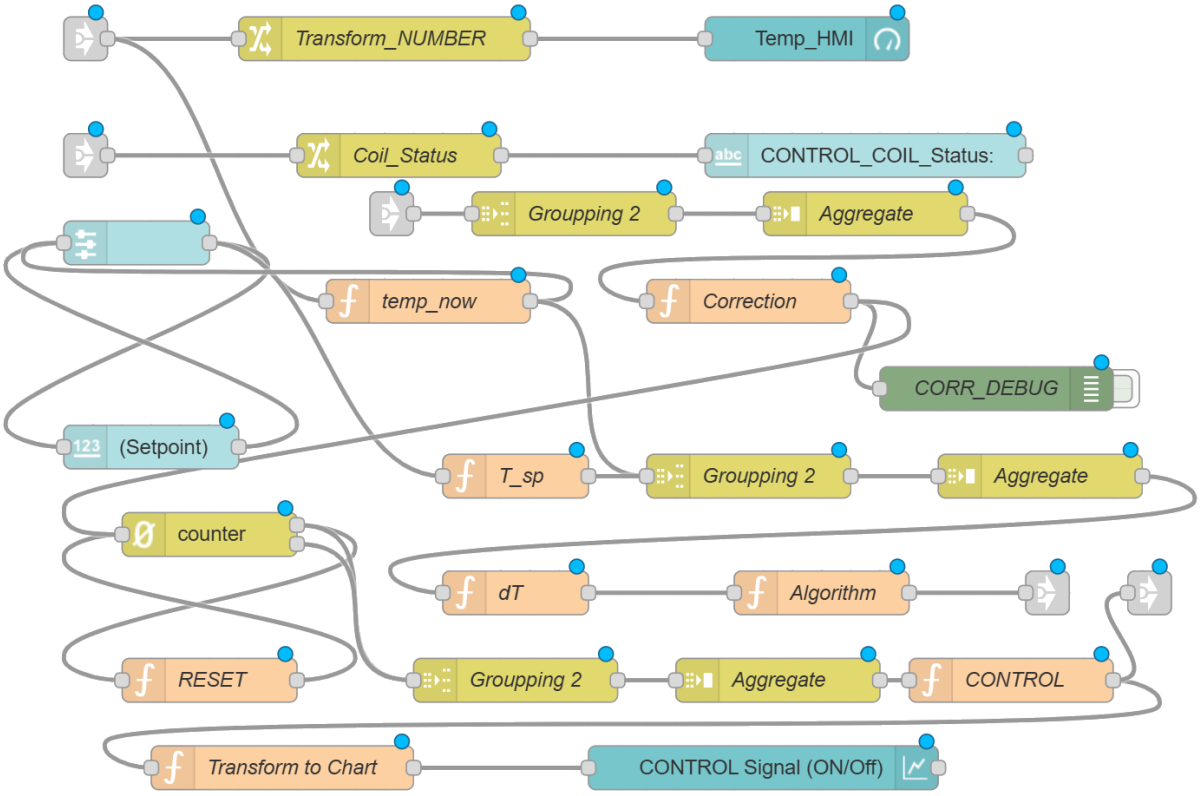

Рисунок 10 – Програма реалізації потоку «CONTROL»

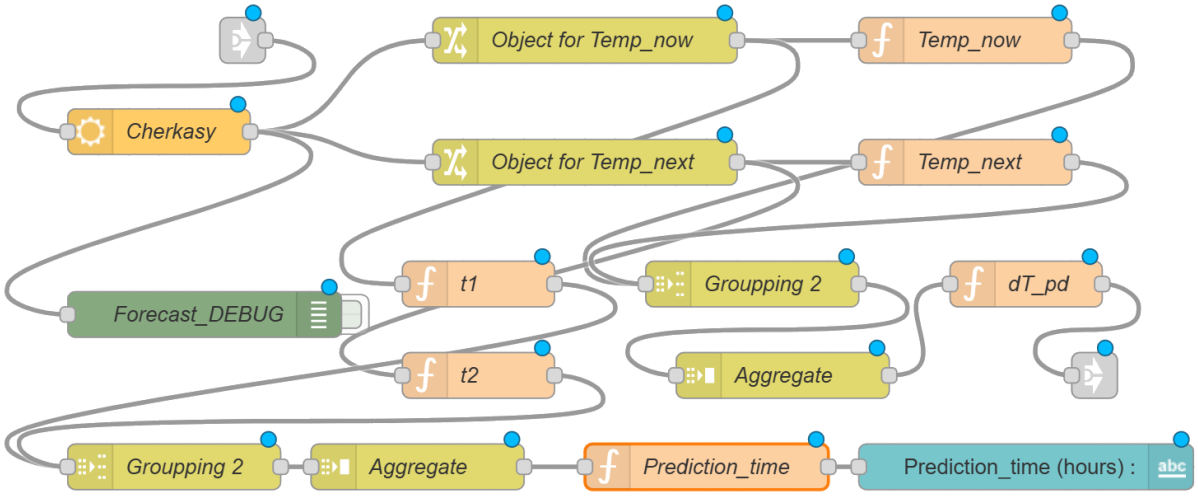

Рисунок 11 – Реалізація методу предикції у вузлі «OpenWeatherMap_predict»

Таким чином, реалізована серверна архітектура забезпечує ефективну інтеграцію IoT-модуля в систему керування. Використання передових інструментів, таких як Node-RED і OpenWeatherMap, дозволяє автоматизувати процеси, підвищити їхню точність і зменшити витрати енергії. Представлена методика є універсальним рішенням для впровадження в інтелектуальні системи керування мікрокліматом у приміщеннях.

Висновки. У даній статті представлено інноваційний підхід до прогнозованого управління системами опалення з використанням технологій Інтернету речей (IoT) та предиктивної аналітики. Проведене дослідження дозволило розробити ефективну модель управління, що враховує теплові втрати, дискретний режим роботи котла та зовнішні погодні умови, прогнозовані за допомогою сервісу OpenWeatherMap.

Запропонована методика є універсальною та може бути застосована для управління мікрокліматом не лише в житлових, а й у промислових приміщеннях, теплицях та інших об’єктах. Подальші дослідження можуть бути зосереджені на інтеграції нових типів датчиків та алгоритмів машинного навчання для ще більшої оптимізації енергоспоживання.

Список літератури

1. An iot-based smart controlling system of air conditioner for high energy efficiency / W. Song et al. *2017 IEEE International Conference on Internet of Things (iThings) and IEEE Green Computing and Communications (GreenCom) and IEEE Cyber, Physical and Social Computing (CPSCom) and IEEE Smart Data (SmartData)*, Exeter, UK, 21–23 June 2017. P. 442–449. DOI: https://doi.org/10.1109/ithings-greencom-cpscom-smartdata.2017.72.
2. IoT based architecture for model predictive control of HVAC systems in smart buildings / R. Carli et al. *Sensors*. 2020. Vol. 20, no. 3. 781. DOI: https://doi.org/10.3390/s20030781.
3. Internet-of-Things based hardware-in-the-loop framework for model-predictive-control of smart building ventilation / A. Kharbouch et al. *Sensors*. 2022. Vol. 22, no. 20. 7978. DOI: https://doi.org/10.3390/s22207978.
4. An IoT based smart thermostat / L. Ozgur et al. *2018 5th International Conference on Electrical and Electronic Engineering (ICEEE)*, Istanbul, Turkey, 3–5 May 2018. P. 252–256. DOI: https://doi.org/10.1109/iceee2.2018.8391341.
5. Subahi A. F., Bouazza K. E. An intelligent iot-based system design for controlling and monitoring greenhouse temperature. *IEEE Access*. 2020. Vol. 8. P. 125488–125500. DOI: https://doi.org/10.1109/access.2020.3007955.
6. Cheng Y. L., Lim M. H., Hui K. H. Impact of internet of things paradigm towards energy consumption prediction: a systematic literature review. *Sustainable Cities and Society*. 2022. Vol. 78. 103624. DOI: https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103624.
7. Adaptive-predictive control strategy for HVAC systems in smart buildings – A review / M. Gholamzadehmir et al. *Sustainable Cities and Society*. 2020. Vol. 63. 102480. DOI: https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102480.
8. Bedi G., Venayagamoorthy G. K., Singh R. Development of an IoT-driven building environment for prediction of electric energy consumption. *IEEE Internet of Things Journal*. 2020. Vol. 7, no. 6. P. 4912–4921. DOI: https://doi.org/10.1109/jiot.2020.2975847.
9. Development of an IoT-based big data platform for day-ahead prediction of building heating and cooling demands / X. J. Luo et al. *Advanced Engineering Informatics*. 2019. Vol. 41. 100926. DOI: https://doi.org/10.1016/j.aei.2019.100926.
10. Data-Driven predictive control of building energy consumption under the IoT architecture / J. Ke et al. *Wireless Communications and Mobile Computing*. 2020. Vol. 2020. 849541. DOI: https://doi.org/10.1155/2020/8849541.
11. Integrated control strategy of district heating system based on load forecasting and indoor temperature measurement / C. Sun et al. *Energy Reports*. 2022. Vol. 8. P. 8124–8139. DOI: https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.06.031.
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. 351. DOI: https://doi.org/10.3390/buildings12030351.
13. Hang L., Kim D.-H. Enhanced model-based predictive control system based on fuzzy logic for maintaining thermal comfort in iot smart space. *Applied Sciences*. 2018. Vol. 8, no. 7. 1031. DOI: https://doi.org/10.3390/app8071031.
14. Predictive thermal comfort control for cyber-physical home systems / O. Sian En et al. *2018 13th Annual Conference on System of Systems Engineering (SoSE)*, Paris, France, 19–22 June 2018. P. 444–451. DOI: https://doi.org/10.1109/sysose.2018.8428734.
15. Predicting hourly heating load in a district heating system based on a hybrid CNN-LSTM model / J. Song et al. *Energy and Buildings*. 2021. Vol. 243. 110998. DOI: https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.110998.
16. An online Grey-box model based on Unscented Kalman Filter to predict temperature profiles in smart buildings / M. Massano et al. *Energies*. 2020. Vol. 13, no. 8. 2097. DOI: https://doi.org/10.3390/en13082097.
17. Imran, Iqbal N., Kim D. H. IoT task management mechanism based on predictive optimization for efficient energy consumption in smart residential buildings. *Energy and Buildings*. 2022. Vol. 257. 111762. DOI: https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111762.
18. Програмна адаптація опорного алгоритму для дискретного регулювання / В. С. Ноздренков та ін. *Проблеми інформатизації та управління*. 2024. Т. 2, № 78. С. 52–60. DOI: https://doi.org/10.18372/2073-4751.78.18961.

References

1. W. Song, N. Feng, Y. Tian, and S. Fong, “An iot-based smart controlling system of air conditioner for high energy efficiency”, in *2017 IEEE International Conference on Internet of Things (iThings) and IEEE Green Computing and Communications (GreenCom) and IEEE Cyber, Physical and Social Computing (CPSCom) and IEEE Smart Data (SmartData)*, Exeter, UK, UK, Jun. 21–23, 2017. n.d., pp. 442–449, doi: https://doi.org/10.1109/ithings-greencom-cpscom-smartdata.2017.72
2. R. Carli, G. Cavone, S. Ben Othman, and M. Dotoli, “IoT based architecture for model predictive control of HVAC systems in smart buildings”, *Sensors*, vol. 20, no. 3, Jan. 2020, Art. no. 781, doi: https://doi.org/10.3390/s20030781
3. A. Kharbouch *et al*., “Internet-of-Things based hardware-in-the-loop framework for model-predictive-control of smart building ventilation”, *Sensors*, vol. 22, no. 20, Oct. 2022, Art. no. 7978, doi: https://doi.org/10.3390/s22207978
4. L. Ozgur, V. K. Akram, M. Challenger, and O. Dagdeviren, “An IoT based smart thermostat”, in *2018 5th International Conference on Electrical and Electronic Engineering (ICEEE)*, Istanbul, Turkey, May 3–5, 2018. n.d., pp. 252–256, doi: https://doi.org/10.1109/iceee2.2018.8391341
5. A. F. Subahi and K. E. Bouazza, “An intelligent iot-based system design for controlling and monitoring greenhouse temperature”, *IEEE Access*, vol. 8, pp. 125488–125500, 2020, doi: https://doi.org/10.1109/access.2020.3007955
6. Y. L. Cheng, M. H. Lim, and K. H. Hui, “Impact of Internet of Things paradigm towards energy consumption prediction: A systematic literature review”, *Sustainable Cities and Society*, vol. 78, Mar. 2022, Art. no. 103624, doi: https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103624
7. M. Gholamzadehmir, C. Del Pero, S. Buffa, R. Fedrizzi, and N. Aste, “Adaptive-predictive control strategy for HVAC systems in smart buildings – A review”, *Sustainable Cities and Society*, vol. 63, Dec. 2020, Art. no. 102480, doi: https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102480
8. G. Bedi, G. K. Venayagamoorthy, and R. Singh, “Development of an IoT-driven building environment for prediction of electric energy consumption”, *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 7, no. 6, pp. 4912–4921, Jun. 2020, doi: https://doi.org/10.1109/jiot.2020.2975847
9. X. J. Luo, L. O. Oyedele, A. O. Ajayi, C. G. Monyei, O. O. Akinade, and L. A. Akanbi, “Development of an IoT-based big data platform for day-ahead prediction of building heating and cooling demands”, *Advanced Engineering Informatics*, vol. 41, Aug. 2019, Art. no. 100926, doi: https://doi.org/10.1016/j.aei.2019.100926
10. J. Ke *et al.*, “Data-Driven predictive control of building energy consumption under the IoT architecture”, *Wireless Communications and Mobile Computing*, vol. 2020, Dec. 2020, Art. no. 849541, doi: https://doi.org/10.1155/2020/8849541
11. C. Sun *et al*., “Integrated control strategy of district heating system based on load forecasting and indoor temperature measurement”, *Energy Reports*, vol. 8, pp. 8124–8139, Nov. 2022, doi: https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.06.031
12. X. Gao, M. Jia, S. Cao, and C. Qi, “Study of an integrated control method for heating substations based on prediction of water-supply temperature and indoor temperature”, *Buildings*, vol. 12, no. 3, Mar. 2022, Art. no. 351, doi: https://doi.org/10.3390/buildings12030351
13. L. Hang and D.-H. Kim, “Enhanced model-based predictive control system based on fuzzy logic for maintaining thermal comfort in iot smart space”, *Applied Sciences*, vol. 8, no. 7, Jun. 2018, Art. no. 1031, doi: https://doi.org/10.3390/app8071031
14. O. Sian En, M. Yoshiki, Y. Lim, and Y. Tan, “Predictive thermal comfort control for cyber-physical home systems”, in *2018 13th Annual Conference on System of Systems Engineering (SoSE)*, Paris, France, Jun. 19–22, 2018. n.d., pp. 444–451, doi: https://doi.org/10.1109/sysose.2018.8428734
15. J. Song, L. Zhang, G. Xue, Y. Ma, S. Gao, and Q. Jiang, “Predicting hourly heating load in a district heating system based on a hybrid CNN-LSTM model”, *Energy and Buildings*, vol. 243, Jul. 2021, Art. no. 110998, doi: https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.110998
16. M. Massano, E. Patti, E. Macii, A. Acquaviva, and L. Bottaccioli, “An online Grey-box model based on Unscented Kalman Filter to predict temperature profiles in smart buildings”, *Energies*, vol. 13,

no. 8, Apr. 2020, Art. no. 2097, doi: https://doi.org/10.3390/en13082097
17. Imran, N. Iqbal, and D. H. Kim, “IoT task management mechanism based on predictive optimization for efficient energy consumption in smart residential buildings”, *Energy and Buildings*, vol. 257, Feb. 2022, Art. no. 111762, doi: https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111762
18. V. S. Nozdrenkov, A. V. Pavlov, G. A. Oleksiienko, O. Yu. Zhuravlov, and Yu. O. Zhuravlov, “Soft-adaptation of reference algorithm for discrete control”, *Problems of Informatization and Management*, vol. 2, no. 78, pp. 52–60, Jul. 2024, doi: https://doi.org/10.18372/2073-4751.78.18961 (in Ukrainian)

Надійшла (received) 09.12.2024

UDC 681.518:004.942

VALERII NOZDRENKOV ✉ – Candidate of Technical Sciences (PhD), Docent, Doctoral Candidate at the Department of Computer Science and Systems Analysis, Cherkasy State Technological University; Cherkasy, Ukraine; ORCID: https://orcid.org/0009-0002-0579-6821; e-mail: v.s.nozdrenkov.d24@chdtu.edu.ua.

ANDRII PAVLOV – Candidate of Physical and Mathematical Sciences (PhD), Docent, Associate Professor of the Control Systems and Robotics Department; Sumy State University; Sumy, Ukraine; ORCID: https://orcid.org/0009-0002-8861-8472; e-mail: a.pavlov@ksu.sumdu.edu.ua.

GALYNA OLEKSIYENKO – Candidate of Physical and Mathematical Sciences (PhD), Docent, Associate Professor of the Computer Science Department; Sumy State University; Sumy, Ukraine; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0274-5095; e-mail: galyana2@ukr.net.

OLEKSANDR ZHURAVLOV – Candidate of Technical Sciences (PhD), Docent, Senior Lecturer of the Control Systems and Robotics Department; Sumy State University; Sumy, Ukraine; ORCID: https://orcid.org/0009-0002-7834-6661; e-mail: san.75@i.ua.

YURII ZHURAVLOV – software engineer, “NETCRACKER LLC”; Sumy, Ukraine; ORCID: https://orcid.org/0009-0008-2369-198X; e-mail: nagatoura@gmail.com.

PREDICTIVE CONTROL OF HEATING SYSTEMS USING IOT AND PREDICTIVE ANALYTICS

The article explores the principles and methods of predictive control for heating systems using Internet of Things (IoT) technologies and predictive analytics to optimize energy consumption and maintain indoor temperature stability. The proposed model is designed to control the heating process in buildings by incorporating heat loss dynamics and leveraging external temperature forecasting. IoT sensors and external data from the OpenWeatherMap cloud service gather real-time environmental and system data. Predictive algorithms process this data to proactively generate control signals that adjust the heating system. The model adapts traditional PI/PID controllers for discrete-mode operation, particularly for modern boiler systems. This adaptation ensures high-quality transitional responses, prevents temperature overshoots, and minimizes fluctuations, all while maintaining energy efficiency and comfort. The implementation of the model is demonstrated using MATLAB Simulink for simulation and validation. Node-RED is used for software integration, utilizing the Modbus TCP protocol to enable communication between sensors, the control system, and actuators. The architecture follows a distributed “server–actuator” design, allowing centralized data processing with direct interaction with IoT devices. This setup facilitates integration with external services such as weather forecasting platforms. Modelling results confirm that integrating forecasted external temperature changes reduces energy consumption while ensuring stable indoor temperatures. The methodology demonstrates significant potential for energy-efficient heating control, highlighting the advantages of IoT technologies in automating climate control. Future developments could extend these techniques to broader building automation and energy management applications.

Keywords: Internet of Things (IoT), predictive analytics, heating control, heat losses, temperature forecasting, PI/PID controller, energy efficiency, process automation, cloud services, OpenWeatherMap, Node-RED, ModBus TCP protocol, MATLAB Simulink, discrete control mode, climate systems.