

РЕЦЕНЗІЯ

офіційного рецензента на дисертацію
Сінькевича Олега Олександровича
«Оптимізація функціонування інтелектуальних об'єктів
з використанням методів машинного навчання»,
подану на здобуття ступеня доктора філософії
за спеціальністю 122 «Комп'ютерні науки»

Актуальність тематики дослідження

Розробка та дослідження інтелектуальних об'єктів в контексті забезпечення їх оптимального функціонування у період активного розвитку технологій інтернету речей (IoT) є однією з пріоритетних задач галузі. Ріст складності таких об'єктів та збільшення кількості відповідних даних створюють можливість застосування сучасних підходів на базі машинного та глибокого навчання. Окрім цього, для успішного проектування інтелектуальних об'єктів необхідно забезпечувати поєднання програмного забезпечення з апаратною частиною, що передбачає залучення мікроконтролерних та мікрокомп'ютерних пристроїв.

Окремим класом інтелектуальних об'єктів є інтелектуальний будинок, який реалізує взаємну інтеграцію програмних компонент з апаратними комплексами. Програмні модулі зазвичай ґрунтуються на алгоритмах інтелектуального аналізу даних, їх статистичної обробки та засобах машинного навчання, а апаратні — на взаємодії сенсорів, мікроконтролерів та локальних, або хмарних серверів. Оскільки хмарні технології мають низку недоліків, пов'язаних з мережевими затримками, вимогою постійного доступу до глобальної мережі та приватністю даних, виникає потреба у розробці та впровадженні підходів, які спираються на функціонування незалежних від хмарних сервісів локальних систем, наприклад таких, які базуються на граничних та туманних обчисленнях.

Дисертація О. О. Сінькевича присвячена розробці прототипу програмного комплексу для оптимізації функціонування інтелектуального будинку, в основі якого лежить парадигма граничних обчислень з використанням спроектованого нейроконтролера на базі мікроконтролера STM32 та локального сервера, розгорнутого на мікрокомп'ютері Nvidia Jetson Nano. Також у роботі реалізовані та досліджені регресійно-кореляційні й нейромереві моделі для обробки даних інтелектуального будинку та здійснене розгортання рекурентної нейронної для прогнозу температур на мікроконтролері, що є актуальною задачею у граничних обчисленнях. Розроблена серверна частина на мікрокомп'ютері та взаємодія з нейроконтролером реалізована згідно сучасних концепцій MLOPS та REST архітектури. Запропоновані теплофізичні моделі оцінки ефективних теплових параметрів інтелектуального будинку та джерел обігріву є важливими для вирішення проблем аналізу та оптимізації його функціонування.

Ступінь обґрунтованості результатів, їх наукова новизна

У дисертаційній роботі О. О. Сінькевича отримано такі наукові результати:

вперше

- на основі розв'язку оберненої задачі теплопровідності запропоновано підхід до оцінки теплофізичних параметрів інтелектуального будинку — ефективних коефіцієнтів теплопровідності та теплоємності на базі на температурної динаміки та відповідних даних споживання енергії для обігріву;
- розроблено підхід для ідентифікації ефективного теплофізичного параметру нагрівального елемента, що ґрунтується на фізико-статистичній моделі з використанням рівняння теплопереносу та розподілів внутрішніх і зовнішніх температур повітря, а також температур на нагрівальних елементах, встановлених у кімнатах;
- запропоновано новий підхід до обробки сенсорних даних інтелектуального будинку на основі нейроконтролерної системи та рекурентної нейронної мережі для прогнозу внутрішніх температур;

отримали подальший розвиток

- регресійно-кореляційні моделі для аналізу і дослідження кліматичних та енергетичних даних інтелектуального будинку, а також модель і методи дезагрегації даних споживання енергії, які дають змогу кількісно виділяти частини з сумарної енергії у відповідності до конкретних її споживачів;
- розробка апаратно-програмного комплексу для оптимізації функціонування інтелектуального будинку з використанням рекурентних нейромереж, REST архітектури, MLOps.

Структура і зміст дисертаційної роботи

Дисертаційна робота О. О. Сінькевича є логічно побудованим дослідженням, що послідовно описує підходи до побудови як прототипу апаратно-програмного комплексу, так і відповідних програмних модулів на базі алгоритмів обробки даних та розроблених теплофізичних моделей й моделей машинного навчання. Вона складається з анотації (українською та англійською мовами), вступу, де визначено актуальність, новизну, мету і завдання дослідження, чотирьох розділів із висновками до кожного з них, загальних висновків, списку використаної літератури та додатку з науковими публікаціями і участі у конференціях дисертанта.

У вступі дисертації зазначено мету дослідження (ст. 23), що полягає у розробці нових апаратно-програмних рішень та доповненні існуючих для оптимізації роботи інтелектуального об'єкту на прикладі системи інтелектуального будинку. Я вважаю, що вказана мета дослідження чітко демонструє відношення даної роботи до сфери комп'ютерних наук та підкріплена добре сформованим списком завдань, об'єктом і

предметом дослідження. Зокрема, у вступній частині дисертації визначена актуальність та важливість тематики дослідження, а саме розглянуто основні підходи до проектування систем інтелектуального будинку. Автор звертає увагу на недоліки хмарних сервісів для інтелектуального будинку та недостатність вичерпного аналізу застосування систем на базі граничних обчислень. Крім того, згадується про важливість розробки та дослідження теплофізичних моделей для теплових станів інтелектуального будинку з їх подальшою інтеграцією у відповідне програмне забезпечення. Вирішення цих проблем лежить в основі дисертації О. О. Сінькевича і окреслює вищезазначену новизну дослідження. Також у вступі автором зазначено зв'язок дисертації з науковими-дослідними темами в межах робочого часу на кафедрі радіоелектронних і комп'ютерних систем ЛНУ імені Івана Франка.

Основні результати дисертаційної роботи О. О. Сінькевича викладено у розділах 1-4 дисертації. Дисертаційне дослідження можна описати так: аналіз поточного стану досліджень у проектуванні інтелектуального будинку, граничних обчислень та алгоритмів обробки даних зокрема, машинного навчання (розділ 1); розробка і дослідження нейромережових та статистичних моделей обробки даних інтелектуального будинку (розділ 2), які в свою чергу становлять частину створеного програмного забезпечення для прототипу апаратно-програмного комплексу (розділ 3) та побудова теплофізичних моделей для обчислення ефективних теплових параметрів будівлі та обігрівальних елементів (розділ 4), які можна включати у програмне забезпечення прототипу.

Метою першого розділу *“Аналіз розробок інтелектуальних об'єктів на прикладі інтелектуального будинку”* є дослідження сучасного стану технологій інтелектуального будинку та дано його розгорнуте визначення (ст. 29). Для цього, у параграфі 1.1 наведені види типових систем та визначені недоліки використання хмарних сервісів, позаяк такий опис можна було б доповнити еволюцією згаданих систем. Для усунення цих недоліків дисертантом описана та проаналізована концепція граничних обчислень та їх поєднання з алгоритмами машинного навчання (ст. 31-34), де автор фокусує увагу на потребі розробки таких підходів. Також, досить вичерпно проаналізована апаратна структура інтелектуального будинку, що передбачає використанням локального серверу та допоміжного мікроконтролерного устаткування. З метою аналізу повного процесу обробки даних інтелектуального будинку автором розглянута відповідна потокова схема, в межах якої дано огляд регресійно-кореляційних моделей клімату інтелектуального будинку, задачі дезагрегації споживання енергії та прогностичних моделей для даних у вигляді часового ряду, де означена перспектива нейромережових моделей відносно статистичних лінійних підходів. Здійснений теоретичний аналіз апаратних та програмних рішень для розгортання таких моделей, хоча, на мою думку, можна було б додати до цього ще й огляд відповідної програмної архітектури. Розділ завершується коротким оглядом теплофізичного моделювання інтелектуального будинку (ст. 52), який окреслює аспекти визначення його теплофізичних параметрів.

У другому розділі *“Розробка статистичних та нейромережових моделей”* дисертантом наводиться опис використаних у дослідженні даних — відкритої бази

даних інтелектуальних будинків REFIT та власних даних, зібраних у лабораторних умовах (ст. 58). Розглянутий та реалізований процес очищення даних з використанням інтерполяції, STL-декомпозиція та методу ізольованого лісу.

З метою вивчення взаємозв'язків даних та побудови простих прогностичних моделей автором здійснено регресійно-кореляційне моделювання кліматичних та енергетичних даних інтелектуального будинку (ст. 63-73). Оскільки не всі набори даних під час дослідження демонструють чіткий лінійний зв'язок, дисертантом було використано поліноміальну регресію та метод на базі градієнтного підсилення (бустінгу). Запропоновано підхід до дезагрегації споживання енергії (природного газу) на базі виділення ознак профілів споживання і кластеризації, а також побудована модель споживачів.

Для створення нейромережових моделей прогнозу температур, автором розглянуто процеси підготовки даних та побудови рекурентних нейромереж на базі LSTM, GRU та гібридних згортково-рекурентних архітектур для їх подальшого розгортання на мікроконтролері. Важливим питанням є підбір гіперпараметрів моделей, що реалізовано з використанням генетичного алгоритму.

Результати відбору рекурентної нейромережі для нейроконтролера, показують можливість використання запропонованої автором методики побудови, оптимізації та застосування нейромереж для прогнозу температури у приміщенні інтелектуального будинку, а отримані розміри моделей — для їх розгортання на мікроконтролерах STM32.

Третій розділ “*Прототип нейроконтролерної системи*” містить результати проектування апаратно-програмного комплексу оптимізації функціонування інтелектуального будинку. Для цього автором означена концепція, завдання, апаратна і програмна архітектури. Описана структура серверної частини та сучасні програмні каркаси для її розробки, а також створені програмні компоненти та потокова схема їх взаємодії (ст. 107). Конфігурація даної системи базується на конфігураційному файлі у форматі YAML, а весь процес взаємодії програмних частин реалізований згідно стандартів MLOPS. Основним результатом третього розділу є реалізація об'єднання мікрокомп'ютера Nvidia Jetson Nano, функцією якого є запуск локального веб-сервера uvicorn, що забезпечує доступ до розробленої backend частини і обробку HTTP запитів та нейроконтролера та бази STM32, який відповідає за функціонування розгорнутої на ньому нейромережі. Backend частина реалізована з використанням асинхронного програмного каркасу FastAPI, мови програмування Python 3, REST архітектури та сервісів MLOPS: системи реєстрації і відстежування нейромережових моделей Mflow й засобу оркестрування Apache Airflow. Ідея, закладена у такій реалізації полягає у створенні програмного сервісу для навчання нейромережових моделей для прогнозування температур, їх реєстрації, збереження температурних даних у SQLite та забезпечення цілісності цього процесу шляхом використання Apache Airflow. Такий підхід збільшує гнучкість системи та полегшує її зміну, масштабування та доповнення. Процес завантаження навченої нейромережової моделі у нейроконтролер реалізований автоматично: перетворення її у C-масиви ваг відповідно до топології та

надсилання на нейроконтролер з використанням TCP-сокетів через проміжний мережевий шлюз — мікроконтролер ESP32.

Останній розділ дисертації “*Розробка теплофізичних моделей інтелектуального будинку*” має на меті показати перспективність використання теплофізичного моделювання для оцінки теплофізичних параметрів будівлі — коефіцієнтів теплопровідності та теплоємності. Дана методика ґрунтується на розв’язування прямих та обернених задач теплопровідності відносно згаданих коефіцієнтів. Такий підхід може бути корисний для оцінки теплозберігаючих властивостей будівлі базуючись лише на вимірюванні зовнішніх і внутрішніх температур та даних споживання енергії обігріву. Оскільки дані для даного дослідження бралися з відкритої бази REFIТ та не містять необхідної інформації для порівняння результатів, запропонований підхід варто розвивати і досліджувати на власних експериментальних даних. Також, на підставі розв’язку задачі теплопровідності автором запропонована методика оцінки та подальшого уточнення теплового параметру джерела обігріву, який можна використовувати для порівняння ефективності нагрівальних елементів.

Повнота наукових положень дослідження у дисертації та публікаціях

У дисертації О. О. Сінкевича сформульовані завдання, необхідні положення та повністю розкрито їх зміст відповідно до тематики дослідження. Вони відображені у семи наукових публікаціях. Також дисертантом апробовано результати на дев’яти конференціях з очною та дистанційною формою участі, три з яких індексується у міжнародній наукометричній базі Scopus. Отримано патент на корисну модель. Здійснена доповідь на фаховому семінарі кафедри радіоелектронних і комп’ютерних систем ЛНУ імені Івана Франка.

Практичне значення наукових результатів

Отримані результати дозволяють проектувати інтелектуальні об’єкти згідно концепції граничних й туманних обчислень з використанням методів машинного навчання. За допомогою побудованого прототипу апаратно-програмного комплексу та розроблених моделей можна реалізовувати оптимізаційні процеси у функціонування інтелектуальних об’єктів, а також проводити наукові дослідження. Програмна і апаратна архітектури забезпечують достатню гнучкість системи стосовно її масштабування, доповнення та зміни.

Відомості про дотримання академічної доброчесності

Ознайомившись із науковими публікаціями та дисертацією О. О. Сінкевича, відзначимо відсутність порушень академічної доброчесності.

Зауваження до дисертації

Хоча дисертаційне дослідження загалом виконане на достатньо високому рівні, можна вказати декілька зауважень:

1. Варто було б провести більш детальний аналіз існуючих інтелектуальних об'єктів, зокрема, інтелектуальних будинків, та підходів у використанні методів машинного навчання в управлінні такими об'єктами.
2. Доцільно було б провести порівняльний аналіз більшого класу алгоритмів машинного навчання для прогнозних моделей, використовуючи більшу кількість наборів даних. Можна було б більше уваги приділити процесу формування та відбору прогнозних ознак для моделей машинного навчання. Варто було б провести порівняльний аналіз різних методів оптимізації гіперпараметрів для моделей машинного навчання.
3. Наведені та проаналізовані результати розв'язування теплофізичних задач доцільно було б порівняти з результатами, отриманими на власних експериментальних даних.
4. Доцільно було б детальніше проаналізувати технологічний та економічний ефект від впровадження запропонованих автором методів та підходів.

Вказані зауваження та окреслені недоліки не впливають на загальну високу оцінку одержаних науково-прикладних результатів.

Висновок щодо відповідності дисертації нормам

Дисертація О. О. Сінькевича на тему «Оптимізація функціонування інтелектуальних об'єктів з використанням машинного навчання» подана на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю 122 «Комп'ютерні науки» є завершеним дослідженням, яке розглядає актуальні проблеми розробки програмного та апаратного забезпечення для оптимізації функціонування інтелектуальних об'єктів на прикладі інтелектуального будинку. Отримані результати дають змогу створити ефективний систему з можливістю її гнучкого розширення.

Вважаю, що за новизною, актуальністю, обсягом та практичним значенням дисертація відповідає вимогам наказу МОН України № 40 від 12.01.2017 р. «Про затвердження Вимог до оформлення дисертації» (з наступними змінами) та «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України №44 від 12 січня 2022, а її автор, Сінькевич Олег Олександрович, заслуговує присудження йому ступеня доктора філософії за спеціальністю 122 «Комп'ютерні науки».

Офіційний рецензент – доктор технічних наук, доцент,
професор кафедри системного проектування
Львівського національного університету імені Івана Франка

Б. М. Павлишенко