

## РЕЦЕНЗІЯ

на дисертацію

Сінькевич Олега Олександровича

«Оптимізація функціонування інтелектуальних об'єктів  
з використанням машинного навчання»,  
подану на здобуття ступеня доктора філософії  
за спеціальністю 122 «Комп'ютерні науки»

### *Актуальність тематики дослідження*

Широке використання різних видів інтелектуальних систем та об'єктів, яке зараз спостерігається в практично усіх сферах людської діяльності, має відчутний вплив не тільки на модернізацію і підвищення ефективності виробничих та технологічних процесів, але і на покращення умов проживання людини, досягнення високого рівня комфортності, безпеки і енергоощадності. Такі актуальні завдання можна успішно розв'язувати в рамках інтелектуального будинку, який представляє собою інтегровану систему сенсорів та виконавчих пристроїв, що взаємодіють між собою за допомогою мікроконтролерів та мікрокомп'ютерів, на яких встановлено відповідне програмне забезпечення. Це програмне забезпечення, в тому числі із залученням штучного інтелекту, повинно забезпечити оптимальне функціонування розумного будинку, наприклад, на основі прогнозованої температурної динаміки формувати та реалізовувати енергозберігаючі режими в приміщенні.

Типовий підхід при проектуванні інтелектуальних будинків орієнтується на використання інтернет-комунікацій та хмарних сервісів, які, крім безумовно позитивних властивостей, мають ряд слабких сторін, наприклад, наявність мережевих затримок, можливість тимчасової втрати зв'язку через відключення електропостачання. В дисертаційній роботі пропонується дещо інший (з елементами комплементарності та альтернативності) підхід до розробки інтелектуальних будинків, який базується на застосуванні граничних та туманних обчислень і є актуальним в даній предметній області та має перспективу практичного застосування.

В рамках парадигми граничних та туманних обчислень розроблено апаратно-програмний комплекс, який включає нейроконтролер на базі мікроконтролера STM32 F767 та локального хабу на мікрокомп'ютері Nvidia Jetson Nano з використанням MLOPS та REST архітектур. Використане апаратне середовище дозволяє забезпечити функціонування системи повністю або частково незалежно від хмарних сервісів, а за допомогою розроблених регресійних та нейромережевих моделей можна досить швидко проводити інтелектуальну обробку вхідних даних та здійснювати надійне прогнозування внутрішніх температур та енергоспоживання.

### *Ступінь обґрунтованості результатів, їх наукова новизна*

В дисертаційній роботі О. О. Сінькевича представлено нові обґрунтовані наукові результати, що стосуються розробки та дослідження моделей, які дозволяють оптимізувати функціонування інтелектуального будинку. Розроблені моделі реалізовані у відповідному програмному забезпеченні. Коректність отриманих результатів зумовлена застосуванням стандартних програмних засобів, традиційних методів статистичного аналізу та диференціальних рівнянь, які описують теплофізичні процеси в інтелектуальному будинку. Результати обчислюваних експериментів підтверджують ефективність розроблених алгоритмів та програм.

Серед найбільш важливих результатів дисертаційного дослідження, які володіють науковою новизною, можна виділити такі;

- запропоновано підхід до опрацювання температурних даних інтелектуального будинку за допомогою граничних обчислень на базі мікрокомп'ютерної і мікроконтролерної (нейроконтролерної) системи; такий підхід ґрунтується на використанні рекурентних

нейромереж, які розгортаються на нейроконтролері шляхом активації відповідної view-функції, реалізованої на мікрокомп'ютері Nvidia Jetson Nano; розроблена архітектура такої системи розгортання, яка включає MLOPS конвеєр, MVT архітектурний патерн та REST концепцію;

- проведено чисельне моделювання задач теплопереносу у будівлі розумного будинку та сформульовані пряма й обернена задачі; запропоновано нову методику ідентифікації ефективних коефіцієнтів теплопередачі та теплоємності на основі двохетапного розв'язування оберненої задачі (наближення та уточнення розв'язку двома оптимізаційними алгоритмами); подібним чином представлено методику розв'язування задачі для визначення теплової ефективності нагрівальних пристроїв, а також детально наведено процес виведення та обґрунтування параметрів обігрівальних елементів;

- розроблено регресійні моделі для аналізу та прогнозування кліматичних та енергетичних даних інтелектуального будинку, які окрім прогностичних властивостей дозволяють статистично оцінювати взаємозв'язки між такими даними;

- запропоновано методику виділення із інтегральних даних споживання енергії відносні складові енергоспоживання окремими споживачами;

- здійснена інтеграція генетичного алгоритму для підбору гіперпараметрів рекурентних нейронних мереж у систему, що розгортається на відносно малопотужному мікрокомп'ютері Nvidia Jetson Nano, що відкриває цікавий фронт досліджень у перенесенні метаевристичних методів на мікрокомп'ютерну техніку.

### *Структура і зміст дисертаційної роботи*

Дисертація складається з анотації, вступу, чотирьох розділів з висновками до кожного з них, загальних висновків, використаних джерел інформації із 192 найменувань та додатку з описом публікацій і участі у конференціях. Загальний обсяг дисертації 179 сторінок.

У вступі дисертації наведені аргументи, що підтверджують актуальність проведених досліджень, описано наукову та практичну важливість отриманих результатів, а також зазначено зв'язок дослідження з науковими темами, які виконувались на кафедрі радіоелектронних і комп'ютерних систем ЛНУ імені Івана Франка під час дослідження.

В першому розділі дисертації проведено дослідження актуального стану інтелектуальних будинків, в якому проаналізовано літературні джерела, що описують технології та апаратне устаткування, яке використовується для створення системи контролю будинку. Розглянуто можливі способи обміну даними між компонентами системи, зокрема сервером, мікроконтролерами та сенсорами. Особлива увага приділена парадигмі граничних та туманних технологій, що дозволяють перенести багато обчислень на локальний рівень і які становлять основу розробленого в дисертації апаратно-програмного комплексу для інтелектуального будинку. В цьому розділі також розглянуто регресійні та нейромережеві моделі для прогнозування кліматичних параметрів та дезагрегації споживання енергії, а також описані типові підходи до теплофізичного моделювання будинку та приміщень в ньому.

У другому розділі дисертаційної роботи розповідається про те, які бази даних використовувались для проведення досліджень. А саме, це відкрита база даних REFIT, що містить дані про інтелектуальні будинки, та база даних, що була отримана в лабораторії інтелектуальних автономних систем ЛНУ. Перед тим, як проводити дослідження, дані з цих баз були піддані попередній обробці, такі як очищення за допомогою процедур інтерполяції, STL-декомпозиції та методу ізольованого лісу. Ці процедури дозволили отримати якісні дані для подальших досліджень, зокрема для регресійного моделювання кліматичних та енергетичних даних інтелектуального будинку.

У дослідженні було випробувано різні методи регресії, такі як поліноміальна регресія та метод градієнтного підсилення. Проте, було зауважено, що потрібно провести більш детальне порівняння ефективності використаних методів. У результаті проведення дослідження були знайдені залежності між різними параметрами, такими як зовнішня та

внутрішня температура, споживання газу та температура на поверхнях батарей, а також зовнішня, внутрішня температура та температура на нагрівальних елементах.

У другому розділі дослідження була зосереджена увага на розробці нейромережових моделей для прогнозування внутрішніх температур у приміщенні. Дослідження, проведені в рамках цієї роботи, показали, що LSTM і GRU рекурентні нейромережі, а також гібридні згортово-рекурентні CNN-LSTM/GRU нейромережі є ефективними для цієї задачі. Генетичні алгоритми були використані для підбору оптимальних значень гіперпараметрів моделей. Однією з переваг розроблених моделей є можливість їх використання на мікроконтролерах STM32 з обмеженими ресурсами.

У дисертаційній роботі центральне місце займає третій розділ, присвячений проектуванню та практичному втіленню апаратно-програмного комплексу. Автор описує концепцію розробленого комплексу, його апаратну та програмну архітектуру. Для реалізації комплексу автор поєднав мікрокомп'ютер Nvidia Jetson Nano з нейроконтролером на базі STM32, що відповідає за функціонування розгорнутої на ньому нейромережі. Зв'язок між цими пристроями здійснюється за допомогою мережевого шлюзу на базі мікроконтролера ESP32. У третьому розділі автор детально описує програмне забезпечення, що включає в себе серверну та клієнтські частини, які розроблені з використанням мови Python 3, MLOPS та REST архітектур, системи реєстрації та відстежування нейромережових моделей Mlflow і засобу оркестрування Apache Airflow. Автор реалізував процес завантаження навченої нейромережової моделі у нейроконтролер шляхом перетворення її у C-масиви ваг з використанням TCP-сокетів через мережевий шлюз - мікроконтролер ESP32. Розроблений апаратно-програмний комплекс був протестований і продемонстровано його працездатність, можливість масштабування та доповнення.

Четвертий розділ дисертації присвячено моделюванню теплофізичних процесів в інтелектуальному будинку з метою оцінки теплофізичних параметрів будівлі. У дослідженні використовувалась відкрита база даних REFIT. Застосування чисельного розв'язання прямої та оберненої задач теплопереносу з урахуванням граничних умов, відповідних для будівлі, дозволило запропонувати новий підхід до оцінки коефіцієнтів теплопровідності (теплопередачі) стін та усередненої теплоємності внутрішнього середовища приміщень, на основі вимірювань внутрішніх та зовнішніх температур і величини потужності обігріву. Також у розділі розглянуто методичку оцінки відносної теплової ефективності обігрівальних елементів з використанням аналогічного підходу.

#### *Повнота наукових положень дослідження у дисертації та публікаціях*

Дослідження, які виконав дисертант, були зрозуміло, переконливо та докладно описані в його дисертації та наукових публікаціях. Він опублікував результати своєї роботи у семи наукових публікаціях та трьох матеріалах конференцій, які є частиною міжнародної наукометричної бази Scopus. Крім того, він презентував результати своєї роботи на дев'яти конференціях, які були проведені як очно, так і дистанційно. Він також отримав патент на корисну модель та представив свою роботу на фаховому семінарі кафедри радіоелектронних і комп'ютерних систем ЛНУ імені Івана Франка.

#### *Практичне значення наукових результатів*

У межах підходу граничних обчислень був створений пристрій, який дозволяє забезпечити оптимальну ефективність інтелектуального будинку. Цей пристрій є практично корисним і може бути рекомендований для використання в реальних умовах. Окрім того, були розроблені оптимізаційні алгоритми, які використовують рекурентні нейромережі, та теплофізичні моделі. Ці розробки можуть бути використані для вирішення інших завдань оптимізації.

## *Відомості про дотримання академічної доброчесності*

У дисертації та наукових публікаціях О. О. Сінькевича не виявлено порушень академічної доброчесності.

### *Зауваження до дисертації*

1. У першому розділі дисертаційної роботи доцільно було б дати більш розширений та ґрунтовніший опис програмних архітектур, зокрема проаналізувати використані програми каркаси і розглянути їх переваги та недоліки.
2. Для задач прогнозування часових рядів використовують також лінійні моделі ARIMA, метод Холта-Вінтерса, звичайні мультишарові нейромережі, а також transformers-архітектури. Було б добре здійснити аналіз ознак температурних рядів та додати їх до вхідних даних моделі, а також порівняти представлені моделі з іншими не рекурентними підходами, враховуючи обмежені ресурси пристроїв.
3. У четвертому розділі варто було б навести приклади сценаріїв використання обчислених параметрів обігрівальних елементів та шляхи їх об'єднання з прогностичними моделями з розділу 2.
4. Оскільки робота є комплексною у сенсі поєднання апаратних і програмних засобів, доцільно було б глибше розкрити архітектури та особливості мікроконтролерів у вирішенні поставлених задач.

Необхідно зазначити, що наведені зауваження та рекомендації не є критичними і не впливають на позитивне враження від дисертаційного дослідження.

### *Висновок щодо відповідності дисертації вимогам*

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 в межах поставлених завдань, яке розглядає актуальні проблеми комп'ютерингу та інженерії програмного забезпечення щодо оптимізації функціонування інтелектуальних об'єктів на прикладі інтелектуального будинку.

Вважаю, що за новизною, актуальністю, обсягом та практичним значенням дисертація відповідає нормам 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 12.01.2022 р., а її автор, Сінькевич Олег Олександрович, заслуговує присудження йому ступеня доктора філософії за спеціальністю 122 «Комп'ютерні науки».

### **Рецензент:**

доктор технічних наук, професор,  
професор кафедри кібербезпеки  
Львівського національного університету  
імені Івана Франка

Д. Д. Пелешко