

**Відгук офіційного опонента -
доктора технічних наук, професора Дивака Миколи Петровича
на дисертацію Сінькевича Олега Олександровича
«Оптимізація функціонування інтелектуальних об'єктів з використанням
машинного навчання»,
подану на здобуття ступеня доктора філософії
за спеціальністю 122 «Комп'ютерні науки»**

1. Актуальність теми дослідження та зв'язок з науковими програмами, планами та темами

Засоби штучного інтелекту використовуються для розв'язування широкого кола задач автоматизації, управління та підтримки прийняття рішень. Одним із важливих трендів, при цьому, є розробка та впровадження технологій, які забезпечують комфортне та безпечне проживання людей. Серед таких інтелектуальних об'єктів можна виділити інтелектуальний будинок - апаратно-програмний комплекс, який покликаний автоматизувати процеси, що відбуваються в такому будинку. Апаратна частина інтелектуального будинку складається з набору сенсорів, виконавчих пристроїв, взаємодія між якими здійснюється за допомогою мікроконтролерів та мікрокомп'ютерів з використанням інтернет технологій. Незважаючи на існування різних модифікацій засобів інтелектуального будинку, які характеризуються різним ступенем функціональності та складності, серед інших, актуальною залишається задача оптимізації функціонування цього інтелектуального об'єкту, як мінімум в сенсі зниження енергоспоживання та забезпечення його автономного функціонування. Тому, дисертаційна робота О.О. Сінькевича, яка присвячена розробці прототипу комплексу для оптимізації функціонування інтелектуального будинку, є актуальною та практично значущою.

Актуальність теми дослідження підтверджується тим, що напрям досліджень дисертаційної роботи відповідає пріоритетному напрямку «Інформаційні та комунікаційні технології», відповідно до закону України «Про пріоритетні напрями розвитку науки і техніки».

Дисертаційна робота виконана також у межах наукових досліджень, у Львівському національному університеті імені Івана Франка на кафедрі радіоелектронних і комп'ютерних систем в рамках науково-дослідних тем: «Проектування інтелектуальних мікрокомп'ютерних систем», «Апаратно-програмне забезпечення інтелектуальних систем розумного будинку» та «Розпізнавання образів і біометричний захист інформації засобами машинного навчання» (номери держреєстрації: 0116U001679, 0122U200452 та 0119U002328).

Дослідження, виконані в межах дисертаційної роботи, базуються на концепції граничних обчислень, яка реалізована у нейроконтролері на базі мікроконтролера STM32 та локального сервера на мікрокомп'ютері Nvidia Jetson Nano з використанням MLOPS та REST архітектур. Такий підхід виявився ефективним та дозволив прискорити обробку вхідних даних та забезпечити функціонування системи повністю або частково незалежно від хмарних сервісів,

які незважаючи на широке використання мають ряд недоліків, зокрема необхідність постійного доступу до глобальної мережі, мережеві затримки, тощо. Інтелектуальна обробка даних проводилась в рамках регресійно-кореляційних й нейромережевих моделей та забезпечила отримання надійних результатів щодо прогнозу внутрішніх температур та енергоспоживання. В роботі також розроблені та досліджені теплофізичні моделі оцінки ефективних теплових параметрів інтелектуального будинку та джерел обігріву.

2. Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій

Наукові положення, висновки і рекомендації дисертаційної роботи О.О. Сінькевича в основному обґрунтовано. Вони ґрунтуються на коректному застосуванні методів математичної (регресійно-кореляційний аналіз) та описової статистики, методів апроксимації та методів кластеризації. Для розробки нейроконтрольної системи автором застосовано теорію штучних нейронних мереж, а для побудови фізико-математичних моделей - теорію термодинаміки та варіаційні методи. Для розв'язання обернених задач автором застосовано методи теорії оптимізації, а для проектування програмної системи - об'єктно-орієнтований підхід. Наукова новизна, висновки сформульовані до усіх розділів дисертації, а також висновки мають коректне наукове обґрунтування. Теоретичне підґрунтя, логічна послідовність проведених досліджень, експериментальні підтвердження та результати комп'ютерної симуляції запропонованих методів забезпечують обґрунтованість та достовірність отриманих результатів. Достовірність отриманих результатів зумовлена застосуванням широко апробованих на практиці програмних засобів, традиційних методів статистичного аналізу та стандартних диференціальних рівнянь, які описують теплофізичні процеси в інтелектуальному будинку.

3. Наукова новизна результатів дослідження

Дисертаційна робота О.О. Сінькевича містить нові наукові результати по розробці та дослідженню моделей і програмного забезпечення для оптимізації функціонування інтелектуального будинку.

До найбільш важливих результатів дисертаційного дослідження, які мають наукову новизну, можна віднести:

1. Вперше запропоновано та обґрунтовано математичну модель для оцінки теплофізичних параметрів будівлі (інтелектуального будинку), яка на відміну від існуючих ґрунтується на розв'язуванні оберненої до динамічної задачі теплопереносу, сформульованої відносно шуканих параметрів теплопровідності та теплоємності, що у сукупності забезпечує можливість оптимізації функціонування цього інтелектуального об'єкту в сенсі зниження енергоспоживання.
2. Вперше розроблено фізико-статистичну модель непрямої ідентифікації ефективного теплофізичного параметру нагрівального елемента з використанням рівняння теплопереносу та динаміки внутрішніх і зовнішніх температур, а також температури на нагрівальних елементах і

споживання енергії обігріву, що дає змогу оптимізувати як розташування обігрівальних елементів, так і побудувати поведінкові моделі сценаріїв споживання енергії обігрівачем.

3. Запропонована нова архітектура програмного забезпечення для системи обробки даних інтелектуального будинку, яка інтегрує модулі розгортання рекурентної нейромережі на мікрокомп'ютері з обмеженими обчислювальними ресурсами, а також модулі навчання і підбору гіперпараметрів на стороні мікрокомп'ютера, під'єданого до нейроконтролера, що у сукупності забезпечує автономне функціонування прототипу та підвищення ефективності процесів в інтелектуальному будинку.
4. На основі регресійного аналізу даних, отримали подальший розвиток математичні моделі кліматичних та енергетичних характеристик інтелектуального будинку, які дають змогу здійснювати прогнозування та аналіз взаємозв'язків між температурними і енергетичними даними, що забезпечує можливість оптимізації функціонування інтелектуального об'єкту.

4. Зміст дисертації та відповідність встановленим вимогам

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. Зміст дисертації, її логічне викладення відповідає поставленим завданням дослідження. Рукопис дисертації характеризується завершеністю щодо вирішення поставленої мети.

У *вступі* дисертації аргументується актуальність обраної тематики, яка підтверджується коротким аналізом сучасного стану розробок інтелектуальних об'єктів та розумного будинку, зокрема. Розглянуто найбільш поширені підходи до його проектування, вказано на недоліки застосування хмарних сервісів для інтелектуального будинку, які в значній мірі можна подолати, використовуючи граничні та туманні обчислення. Крім цього, зазначається важливість теплофізичного моделювання, результати якого можна передавати у програмний комплекс, який здійснює керування та прогнозування температурними та енергетичними параметрами розумного будинку. На основі аналізу сучасного стану розробок інтелектуальних об'єктів сформульована мета, яка полягає у розробці нових методів та апаратно-програмних рішень для оптимізації функціонування інтелектуального об'єкту на прикладі розумного будинку. Також перераховано методи, використані для проведення досліджень, описано наукову та практичну значущість отриманих результатів, вказано на зв'язок дисертації з науковими-дослідними темами ЛНУ імені Івана Франка.

В *першому розділі* проведено огляд літератури стосовно проектування інтелектуальних будинків з детальним аналізом технологій та особливостей апаратної системи, яка містить сенсори, виконавчі пристрої, а також локальний сервер та мікроконтролерне устаткування. Розглянуто можливі способи та протоколи обміну між сервером, мікроконтролерами та сенсорами. В цьому

розділі значна увага приділена опису концепції граничних та туманних технологій, які в поєднанні з методами машинного навчання складають ядро розробленого в дисертації апаратно-програмного комплексу для розумного будинку. Також в цьому розділі подано огляд регресійно-кореляційних моделей для кліматичних параметрів інтелектуального будинку, проаналізовані нейромережеві прогностичні моделі, описані задачі дезагрегації споживання енергії. Цей розділ завершується коротким оглядом теплофізичного моделювання інтелектуального будинку, який створює підґрунтя для розв'язання задачі оцінки теплофізичних параметрів розумного будинку та нагрівальних елементів в ньому.

У *другому розділі* описана використана в дисертації відкрита база даних інтелектуальних будинків REFIT, а також база власних даних, отриманих в лабораторії інтелектуальних автономних систем ЛНУ. Для очищення даних використано методи інтерполяції, STL-декомпозиції та ізольованого лісу, що дало можливість автору отримати згладжені дані, придатні для регресійно-кореляційного моделювання кліматичних та енергетичних даних інтелектуального будинку. Автором апробовано різні види регресії, причому найкращі результати отримано при використанні поліномної регресії та методу градієнтного підсилення. В результаті побудовано регресійно-кореляційні залежності між такими наборами параметрів: зовнішні та внутрішні температури; споживання газу та температура на поверхнях батарей; зовнішня, внутрішня температури та температура на нагрівальних елементах.

На основі кластерного аналізу здійснено дезагрегацію споживання енергії, що дало можливість виявляти конкретних споживачів, виходячи із агрегованих даних споживання енергії.

Значна увага у цьому розділі приділена розробці нейромережевих моделей для прогнозу температури в приміщенні. Проведені автором дослідження показали ефективність застосування LSTM і GRU рекурентних нейромереж та гібридних згортково-рекурентних CNN-LSTM/GRU нейромереж для прогнозування температур, причому ці нейромережі можна розгортати на мікроконтролерах STM32 з обмеженими обчислювальними ресурсами. Для зазначених нейромереж, запропоновано визначати оптимальні значення гіперпараметрів їх архітектур з допомогою генетичних алгоритмів.

Третій розділ, який на мою думку, займає центральне місце у дисертаційній роботі, присвячений розробці архітектури програмного забезпечення та самого апаратно-програмного комплексу, що забезпечує оптимальне функціонування розумного будинку. Автором запропоновано поєднання ресурсів мікрокомп'ютера Nvidia Jetson Nano з ресурсами нейроконтролера та бази STM32, який відповідає за функціонування розгорнутої на ньому нейромережі. Зв'язок між зазначеними пристроями здійснюється через мережевий шлюз на базі мікроконтролера ESP32. В цьому розділі детально описано розроблену архітектуру програмного забезпечення, яке включає в себе серверну та клієнтські частини, розроблені з використанням мови Python 3, MLOPS та REST архітектур, системи реєстрації та відстежування нейромережевих моделей Mlflow і засобу оркестрування Apache Airflow.

Здійснено апробацію розробленого апаратно-програмного комплексу та продемонстровано його працездатність.

Четвертий розділ роботи присвячено моделюванню теплофізичних процесів в інтелектуальному будинку з використанням відкритої бази даних REFIT. Отримано числові розв'язки усередненого за координатами рівняння теплопереносу з відповідними граничними умовами, що створило можливість запропонувати новий підхід для оцінки таких теплофізичних параметрів будівлі як коефіцієнти теплопровідності (теплопередачі) стін та ефективної (усередненої) теплоємності внутрішнього середовища приміщень, базуючись лише на вимірюваннях внутрішніх і зовнішніх температур та значеннях енергоспоживання для обігріву приміщення. Також запропонована аналогічна методика для оцінки відносної теплової ефективності обігрівальних елементів.

Висновки відображають отримані результати, але сформульовані дещо декларативно.

5. Практичне значення результатів дисертаційної роботи

Практична значущість результатів дисертаційного дослідження полягає у розробці апаратно-програмного комплексу, що базується на концепції граничних обчислень, дозволяє здійснювати оптимальне функціонування інтелектуального будинку і може бути рекомендований для практичного впровадження в таких об'єктах. Розроблені оптимізаційні алгоритми та програми, в яких використані нейромережеві технології, можуть бути використані також для розв'язання інших оптимізаційних задач. В роботі запропоновано захищений патентом на корисну модель новий метод, який дозволяє шляхом моделювання процесів теплопереносу опосередковано оцінювати теплофізичні параметри будинку.

Отримані у роботі результати впроваджені під час виконання науково-дослідних тем «Проектування інтелектуальних мікрокомп'ютерних систем», «Апаратно-програмне забезпечення інтелектуальних систем розумного будинку» та «Розпізнавання образів і біометричний захист інформації засобами машинного навчання» (номери держреєстрації: 0116U001679, 0122U200452 та 0119U002328), де автор був виконавцем, та в навчальні курси у Львівському національному університеті імені Івана Франка.

6. Повнота викладення основних результатів дисертаційної роботи в опублікованих працях.

Основні наукові положення виконаних дисертантом досліджень, достатньо повно висвітлені у наукових публікаціях. Вони відображені у семи наукових публікаціях та трьох матеріалах конференцій, які індексується у міжнародній наукометричній базі Scopus. Також дисертантом апробовано результати на дев'ятих конференціях з очною та дистанційною формою участі та на фаховому семінарі кафедри радіоелектронних і комп'ютерних систем ЛНУ імені Івана Франка. Варто також відзначити, що автором отримано патент на корисну модель, що підтверджує наукову новизну та практичну значущість отриманих результатів.

7. Відомості про дотримання академічної доброчесності

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

8. Зауваження та дискусійні питання

1. Предмет дисертаційного дослідження сформульовано достатньо широко «методи, моделі та алгоритми обробки даних для оптимізації функціонування інтелектуального будинку», хоча у дисертаційній роботі розглянуто оптимізацію тільки вузького спектру функцій інтелектуального будинку, пов'язаних із енергозбереженням. Звичайно, запропоновані методи та засоби можуть бути використані для оптимізації інших функцій інтелектуального будинку, проте не усіх можливих. Наприклад, функції інтелектуального освітлення в розумному будинку переважно ґрунтуються на сенсорах руху.

2. При встановленні регресійних залежностей між температурними та енергетичними параметрами (розділ 2) автором розглядалися лише гомоскедастичні часові ряди. Разом з тим, варто було розглянути підходи до опрацювання часових рядів, яким притаманна гетероскедастичність.

3. Знаходження оптимальних значень гіперпараметрів для рекурентних нейромережових архітектур (розділ 3) проводилось за допомогою генетичних алгоритмів, при цьому не наведено достатньо аргументів щодо переваг даного методу над іншими оптимізаційними методами. Наприклад, не наведено досліджень щодо застосування методів ройового інтелекту, АБК, чи «зграй сірих вовків». Переваги цих методів, у порівнянні із генетичними алгоритмами, наведено у багаточисленних сучасних публікаціях.

4. При виборі апаратного забезпечення розробленого прототипу автор керується критеріями обмежених обчислювальних ресурсів та необхідної функціональності. При цьому, використання центрального обчислювального хабу на базі графічного багатоядерного конвеєра Nvidia Jetson Nano виглядає дещо протирічно.

5. У дисертаційній роботі доцільно було б виділити нові наукові результати, які стосуються розробки архітектури програмної системи, що інтегрує модулі розгортання, навчання нейронних мереж на базі мікрокомп'ютера з обмеженими обчислювальними ресурсами, так і модулі для оптимізації та налаштування функцій розумного будинку. Взамін цього, автор декларує новизну апаратно-програмного комплексу для оптимізації функціонування інтелектуального будинку. На мою думку, останнє має більше практичну цінність.

6. В дисертації відсутні приклади більш ширшого застосування рішень, які стосуються розумного будинку. Доцільно було б спочатку класифікувати усі можливі функції розумного будинку, а потім запропонувати рішення для їх оптимізації. В протилежному випадку, запропоновані функціональні всеохоплюючі рішення по архітектурі і прототипу виглядають декларативно.

7. Висновки дисертаційної роботи не містять аналізу досягнутих результатів, щодо сформульованої мети «підвищити ефективність функціонування інтелектуальних об'єктів», вони мають також просто

констатуючий характер. Хоча, із контексту дисертації очевидно, що використання обмежених обчислювальних ресурсів для такого класу задач, а також забезпечення автономності розробленого прототипу дає достатній вигравш при реалізації функцій розумного будинку.

Вказані зауваження та дискусійні питання не є принциповими і суттєво не впливають на загальну позитивну оцінку дисертації.

Висновок про відповідність роботи встановленим вимогам МОН України

Дисертація О.О. Сінкевича 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.

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, Сінкевич Олег Олександрович, заслуговує на присудження йому ступеня доктора філософії за спеціальністю 122 «Комп'ютерні науки».

Офіційний опонент:

доктор технічних наук,
професор, декан факультету комп'ютерних
інформаційних технологій
Західноукраїнського національного університету

Микола ДИВАК