

**Відгук офіційного опонента -  
доктора технічних наук, професора Шаховської Наталії Богданівни  
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»**

**Актуальність тематики дослідження**

Розвиток сучасних інтелектуальних об'єктів як симбіозу апаратних систем Інтернету Речей з залученням моделей машинного і глибокого навчання визначає вагомую потребу у продовженні відкритих наукових досліджень з метою розширення знань у даній предметній області. Поряд з інтелектуальними об'єктами промислового масштабу існує ряд менш складних, проте не менш важливих систем — інтелектуальний, або розумний будинок. Такі системи можуть якісно забезпечуватися засобами штучного інтелекту для автоматизації різноманітних процесів, наприклад, керуванням режимів енергоспоживання, що враховують різні фактори, які інколи складно передбачати в межах класичних алгоритмів. Оскільки більшість складних комерційних систем розумного будинку спираються на хмарні технології, виникає потреба у створенні і дослідженні апаратного і програмного забезпечення, яке може функціонувати незалежно від віддалених серверів чи наявності доступу до глобальної мережі Інтернет. Такі рішення ґрунтуються на поєднанні мікрокомп'ютерних і мікроконтролерних пристроїв в одну енергоефективну мережу, а їхня інтеграція та функціонування здійснюється на базі результатів роботи моделей штучного інтелекту, що враховують апаратні обмеження. Оскільки поточний стан досліджень у даній області є далеким від завершення, розроблення локальних систем розумного будинку з використанням машинного навчання є актуальною проблемою, яка розглядається і досліджується у дисертаційній роботі О. Сінькевича.

Зокрема, у дисертації виконані дослідження у контексті граничних і туманних обчислень з залученням мікрокомп'ютера Nvidia Jetson Nano, мікроконтролера STM32, де програмне забезпечення створювалось на основі сучасних програмних каркасів та бібліотек мови програмування Python (нейромережеве і статистичне моделювання). Також, дисертант не оминув теплофізичного моделювання та реалізував моделі теплових станів у розумному будинку відносно окремих теплофізичних параметрів, що, на мою думку, якісно доповнює результати, отримані на базі статистичного і нейромережевого моделювання.

Дані результати можуть застосовуватися при створенні різноманітних систем щодо оптимізації функціонування інтелектуальних об'єктів в межах концепції граничних та туманних обчислень.

Актуальність роботи також підкреслюється виступами на міжнародних наукових конференціях та участю у виконанні науково-дослідних темах в межах робочого часу.

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

Отримані у дисертаційній роботі результати є обґрунтовані чисельними експериментами та представленим прототипом нейроконтролерної системи, для якого розроблене програмне забезпечення. Результати добре візуалізовано; наведені схеми, графіки, а також знімки екрану; проведено теоретичне обґрунтування та пояснення отриманих під час чисельних експериментів параметрів. Коректність результатів базується на використанні добре обумовлених і поширених алгоритмів машинного та статистичного навчання, теорії диференційних рівнянь, генетичних й еволюційних обчислень.

Серед низки отриманих результатів відносно їх новизни можна виділити:

а) підходи до обчислення теплофізичних параметрів конструкції розумного будинку шляхом розв'язування обернених задач на базі відомих розподілів температур та споживання енергії, а також методика оцінки відносних теплофізичних коефіцієнтів джерел обігріву і алгоритм їх уточнення на базі рою часток;

б) реалізацію прототипу граничної нейроконтролерної системи мікрокомп'ютера-мікроконтролера згідно REST архітектури, MLOPS технік та дослідження її функціонування в контексті автоматичного розгортання, навчання та побудови нейромережових моделей прогнозування температури з використанням генетичного алгоритму;

в) метод дезагрегації даних споживання сумарної енергії, який ґрунтується на кластерному аналізі і дає змогу виділяти відносних споживачів енергії;

г) результати дослідження регресійних моделей для прогнозу температур і споживання енергії, зокрема на основі градієнтного бустингу.

### **Структура і зміст дисертаційної роботи**

Текст дисертаційної роботи містить анотацію (українською та англійською мовами), вступ, чотири розділи та відповідні розширені висновки до кожного з них, загальні висновки, перелік джерел з 192 найменувань та додатку з описом публікацій, участі у конференціях та апробацій. Загальний обсяг роботи становить 179 сторінок.

У вступній частині роботи аналізується поточний актуальний стан розробок і досліджень у галузі проектування інтелектуальних будинків, зокрема значну увагу приділено особливостям хмарних обчислень, виділені їх недоліки

та на противагу розглянуті підходи на базі граничних і туманних обчислень. На підставі здійсненого аналітичного огляду визначено мету дослідження — реалізація нових комплексних рішень щодо апаратних пристроїв для оптимізації функціонування інтелектуальних об'єктів на прикладі розумного будинку, програмна частина яких розробляється на основі методів та підходів машинного навчання і теплофізичного моделювання. Зокрема, наведений зв'язок дисертаційного дослідження з науковими-дослідними темами в межах робочого часу, що виконувались дисертантом на кафедрі радіоелектронних і комп'ютерних систем ЛНУ імені Івана Франка

Огляд й аналіз наукових публікацій, присвячених проблематиці дисертаційного дослідження виконаний у *першому розділі* роботи. Тут показана функціональна схема апаратної частини розумного будинку, яка ґрунтується на сенсорах, інтелектуальних модулях на базі мікрокомп'ютера і мікроконтролерів та механізмах взаємодії між ними. В межах підходу граничних обчислень проаналізовані актуальні методики їх впровадження у технологію розумного будинку; особлива увага приділена процесу потоку даних у таких системах та етапів їх інтелектуальної обробки. Ці етапи розкриті в контексті реалізації регресійних моделей щодо кліматичних параметрів розумного будинку, прогностичних нейромережових моделей, моделей дезагрегації та кластерного аналізу. На завершення, поданий опис теплофізичних підходів до моделювання теплових станів в розумному будинку, які можна інтегрувати з вищевказаними етапами обробки даних.

*Другий розділ* дисертації включає опис даних, які використовуються у дослідженні, методику їх попереднього очищення (*STL*-декомпозиція, *isolation forest*). Тут, на мою думку, варто було б доповнити наведений опис більш ґрунтовним дослідження щодо параметрів і налаштувань методу ізольованого лісу. Отримані дані були проаналізовані з використанням регресійних моделей, які включали як лінійні, так і нелінійні (на базі градієнтного бустингу). В результати, побудовані і досліджені моделі можна застосовувати для оцінки залежностей між зовнішніми й внутрішніми температурами, споживанням газу та температурами на поверхнях батарей.

Модель для дезагрегації даних споживання енергії, яка була запропонована у роботі, базується на попередньому виділенні ознак та подальшій їх кластеризації. Хоч дана модель потребує уточнення та проведення додаткового дослідження для обґрунтування результатів, такий підхід є обчислювально простим та має сенс у використанні на малопотужних граничних пристроях.

Для побудови інтелектуального модуля нейроконтролера (мікроконтролер STM32 з розгорнутою на ньому нейромережею), описано та проаналізовано процес побудови прогностичних нейромережових моделей на основі LSTM, GRU та гібридних CNN-LSTM/GRU рекурентних архітектур. З метою обчислення оптимальних гіперпараметрів моделей з урахуванням обмежених потужностей мікроконтролера дисертантом реалізований генетичний алгоритм зі стратегією елітизму та наведені відповідні результати навчання нейромереж.

Результати впровадження моделей обробки даних в апаратно-програмний прототип наведено у *третьому розділі* роботи. Тут досить детально описаний процес інтеграції отриманих у другому розділі моделей у програмну частину мікрокомп'ютера Nvidia Jetson Nano, який є основним обчислювальним вузлом (сервером) розробленої системи. Для цього дисертант застосував перспективні програмні технології мови програмування Python 3 згідно рекомендацій MLOPS методик та базової REST-архітектури. Для керування процесами інтеграції та розгортання, автором було застосовано сервіс оркестрування Apache Airflow та self-hosted MLOPS сервіс Mlflow, що, на мою думку, забезпечує високу гнучкість створеного програмного забезпечення та відповідає сучасним практикам розробки. Навчання та оптимізація гіперпараметрів прогностичних нейромереж здійснюється на мікрокомп'ютері з наступним їх розгортанням на нейроконтролері STM32 через механізм мережесих TCP/IP сокетів. Також, у розділі продемонстровано роботу запропонованого прототипу шляхом знімків екрану та відповідних конфігураційних параметрів.

*Четвертий розділ* дисертаційної роботи містить реалізацію теплофізичних моделей на основі даних REFIT (наведених у другому розділі). На базі розв'язків задач, сформульованих в рамках теплофізичних моделей, запропоновано методику оцінки теплофізичних характеристик конструкції розумного будинку (коефіцієнтів теплопередачі стін та ефективною усередненою теплоємності внутрішнього середовища приміщень), яка ґрунтується лише на вимірюваннях внутрішніх і зовнішніх температур та значеннях енергоспоживання для обігріву. Крім цього, запропонований і досліджений підхід оцінки відносної теплової ефективності обігрівальних елементів, що дає змогу проводити порівняння відносної ефективності батарей та доповнювати метод дезагрегації (розділ 2).

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

Усі наукові положення здійснених досліджень є обґрунтованими, чіткими і в повній мірі висвітлені у дисертації та відповідних наукових публікаціях. Результати опубліковані у семи наукових публікаціях та трьох матеріалах конференцій, які індексується у міжнародній наукометричній базі Scopus. Зокрема, результати апробовано на дев'ятих конференціях з очною та дистанційною формою участі, звітних конференціях ЛНУ імені Івана Франка та отримано патент на корисну модель. Представлена доповідь на фаховому семінарі кафедри радіоелектронних і комп'ютерних систем ЛНУ імені Івана Франка.

### **Практичне значення наукових результатів**

Запропонований прототип апаратно-програмного комплексу для інтелектуального будинку в межах парадигми граничних обчислень дозволяє забезпечувати як оптимальне функціонування, так і вичерпну обробку даних

для побудови аналітики енерговитрат й інших подібних рішень. Даний прототип, що передбачає відсутність хмарної компоненти, може використовуватися для створення систем оптимізації функціонування споріднених інтелектуальних об'єктів та за потреби бути масштабованим. З використанням нейромережових технологій розроблені оптимізаційні алгоритми можуть мати широке застосування і для вирішення інших оптимізаційних задач, окрім тих, для яких вони були початково призначені.

Отримана (патентована) корисна модель дає змогу шляхом моделювання процесів теплопереносу опосередковано визначати теплофізичні параметри конструкції розумного будинку.

### **Відомості про дотримання академічної доброчесності**

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

### **Зауваження до дисертації**

1. При застосуванні методу ізольованого лісу слід здійснити глибше дослідження щодо конфігурації алгоритму та його параметрів.

2. Під час побудови рекурентних нейромережових моделей бажано було б здійснити порівняння з простішими лінійними моделями (SARIMAX), чи простим багатошаровим перцептроном, які могли б бути більш оптимальним під малопотужний пристрій.

3. При розробці програмного забезпечення прототипу — мікрокомп'ютера, окрім сервісу Apache Airflow варто було б проаналізувати використання Celery; а при реалізації генетичного алгоритму дослідити його паралельне виконання.

4. У роботі варто було б обґрунтувати та узагальнити поширення даного прототипу на інші інтелектуальні об'єкти.

5. Описи нейромереж з другого розділу доцільно було б винести в перший.

Вказані зауваження не є суттєвими і не впливають на загальну високу (позитивну) оцінку дисертації.

### **Висновок щодо відповідності дисертації нормам**

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, що стосується актуальних практичних проблем розробки програмного та апаратного забезпечення з метою 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, Сінькевич Олег Олександрович, заслуговує присудження йому ступеня доктора філософії за спеціальністю 122 «Комп'ютерні науки».

**Офіційний опонент:**

доктор технічних наук,  
професор, завідувачка кафедри  
систем штучного інтелекту  
Інституту комп'ютерних наук  
та інформаційних технологій  
Національного університету  
«Львівська політехніка»

Шаховська Н. Б.