

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу

Богзи Миколи Сергійовича

на тему «АВТОМАТИЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ КЕРУВАННЯ АДАПТИВНОЮ СИСТЕМОЮ ПЕРЕРИВЧАСТОГО ТЕПЛОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ БУДИНКУ НА БАЗІ ТЕПЛОНАСОСНОЇ УСТАНОВКИ»

представлену на здобуття ступеня доктора філософії

в галузі знань 15 – Автоматизація та приладобудування

за спеціальністю 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

Актуальність теми дисертації.

Дисертаційна робота Богзи Миколи Сергійовича «Автоматизація процесу керування адаптивною системою переривчастого теплозабезпечення будинку на базі теплонасосної установки» є актуальною з огляду на сучасні вимоги до підвищення енергоефективності та екологічної сталості в будівництві й енергетиці. В умовах зростання вартості енергоресурсів, посилення вимог до скорочення викидів та переходу до відновлюваних джерел енергії, особливої ваги набуває вдосконалення систем опалення будівель, які є основними споживачами теплової енергії.

Використання теплонасосних установок як енергоефективного джерела теплопостачання є перспективним напрямом, однак ефективність їхньої роботи значною мірою залежить від здатності системи керування адаптуватися до змін зовнішніх умов і теплового навантаження. У цьому контексті розроблення адаптивної багаторежимної системи керування, орієнтованої на переривчасте теплозабезпечення, є актуальним як з наукової, так і з практичної точки зору.

Результати дослідження відповідають сучасним підходам до формування «розумних будівель» та дозволяють підвищити ефективність управління теплоспоживанням за рахунок оптимізації режимів роботи системи, зменшення енерговитрат та забезпечення комфортних умов перебування користувачів.

Оцінка обґрунтованості наукових результатів дисертації, їх достовірності та новизни.

Отримані здобувачем наукові результати заслуговують високої оцінки.

Робота має чітку структуру, матеріал подано зрозуміло і в логічній послідовності, завдання дослідження чітко визначені.

Наукові положення, висновки та рекомендації у достатній мірі обґрунтовані. Достовірність отриманих результатів підтверджується коректним використанням методів системного аналізу для визначення основних параметрів та умов роботи системи, методів аналітичного моделювання, що базуються на фундаментальних законах теплообміну та збереження енергії, методів машинного навчання, зокрема нейронних мереж (LSTM), для моделювання нелінійних залежностей, що забезпечують високу точність та швидкодію, імітаційного моделювання, реалізованого в універсальному середовищі MATLAB/Simulink, що дозволяє інтегрувати різні підходи та

методи для дослідження роботи системи, а також методи статистичного аналізу і прогнозування, що дозволило оптимізувати режими керування ТНУ.

Наукова новизна результатів дисертаційного дослідження полягає в наступному:

- вперше виявлено та кількісно обґрунтовано оптимальні параметри переривчастого теплозабезпечення будинку з використанням теплонасосної установки, що дозволяє підвищити енергоефективність системи керування;

- удосконалено алгоритм керування переривчастим обігрівом, який враховує комплексний вплив температури зовнішнього середовища, параметрів прямої води при зниженому навантаженні й у режимі розігріву, а також тривалість розігріву, що забезпечує зменшення споживання електроенергії;

- удосконалено методику інтеграції аналітичних та нейромережових моделей у середовищі MATLAB/Simulink шляхом розробки ефективних алгоритмів, що дозволило істотно скоротити машинний час під час імітаційного моделювання теплових процесів;

- розвинено підходи до оцінювання впливу робочого тіла на динамічні характеристики теплонасосної установки шляхом інтеграції бібліотек з фізико-хімічними властивостями робочих тіл у модель, що дало змогу дослідити ефективність використання нових сумішевих агентів.

Наукові дослідження були виконані здобувачем на кафедрі автоматизації енергетичних процесів КПІ ім. Ігоря Сікорського в рамках в рамках науково-технічної роботи за державним замовленням «Розроблення інтелектуальної низькотемпературної системи теплозабезпечення будівель на базі конденсаційної модульної котельні» (наказ МОН України №1213 від 09.10.2023, державний реєстраційний номер 0123U104476) під керівництвом професора кафедри Автоматизації енергетичних процесів Навчально-наукового інституту атомної та теплової енергетики КПІ ім. Ігоря Сікорського, д.т.н., професора Волощука Володимира Анатолійовича.

Отже, в дисертаційній роботі поставлене наукове завдання розроблення автоматизованої системи керування адаптивною системою переривчастого тепло-забезпечення будинку на базі теплонасосної установки виконано повністю, здобувач повною мірою оволодів методологією наукової діяльності.

Оцінка змісту дисертації, її завершеність та дотримання принципів академічної доброчесності.

За своїм змістом дисертаційна робота здобувача Богзи М. С. повністю відповідає Стандарту вищої освіти зі спеціальності 151 – «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» та напрямкам досліджень відповідно до освітньої програми «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології».

Дисертаційна робота є завершеною науковою працею і свідчить про наявність особистого внеску здобувача у науковий напрям «Енергетика та енергоефективність».

Розглянувши звіт подібності за результатами перевірки дисертаційної роботи на текстові співпадіння, можна зробити висновок, що дисертаційна робота Богзи Миколи Сергійовича є результатом самостійних досліджень здобувача і не містить елементів фальсифікації, компіляції, фабрикації, плагіату

та запозичень. Використані ідеї, результати і тексти інших авторів мають належні посилання на відповідне джерело.

Мова та стиль викладення результатів.

Дисертаційна робота здобувача Богзи М. С. написана українською мовою і повністю відповідає Стандарту вищої освіти за спеціальністю 151 Автоматизація та комп'ютерно інтегровані технології та напрямам досліджень у відповідності до освітньої програми Автоматизація та комп'ютерно інтегровані технології. Виклад результатів досліджень, висновків та рекомендацій є послідовним, чітким і доступним для сприйняття. Кожен розділ дисертації логічно пов'язаний з наступним, а в цілому формується закінчене наукове дослідження.

Дисертація складається з вступу, 5 розділів, висновків, списку літератури та додатків. Загальний обсяг дисертації 172 сторінки.

У вступі дисертації обґрунтовується актуальність дослідження, зумовлена зростанням вартості енергоносіїв, обмеженістю природних ресурсів та екологічними викликами, що робить вдосконалення систем теплозабезпечення (ОВіК) на базі теплонасосних установок (ТНУ) критично важливим. Визначено, що ТНУ, попри свій потенціал, не гарантують оптимальної ефективності без адаптивного керування в умовах змінних зовнішніх та внутрішніх факторів. Зокрема, підкреслюється необхідність розробки алгоритмів для оптимізації нічної уставки температури та тривалості передпускового розігріву для комерційних та адміністративних будівель. Сформована мета роботи, об'єкт та предмет дослідження. Визначені методи дослідження.

У першому розділі проведено аналітичний огляд систем теплозабезпечення та методів їх управління. Розглядається зростаючий попит на енергоефективні технології та роль ТНУ у скороченні використання викопного палива. Наголошується, що традиційні системи працюють у режимі постійного навантаження, що не завжди доцільно, особливо за змінних температурних умов та відсутності людей у будівлі в нічний час. Обґрунтовується необхідність використання математичних моделей для прогнозування та керування тепловими режимами в будівлі, з акцентом на MATLAB, Simulink, Simscape для створення динамічних моделей. Висвітлюються основні виклики у сфері теплозабезпечення та обґрунтовується вибір методів для реалізації енергоефективного управління ТНУ. Розглянуто особливості ТНУ, їх класифікацію за типом джерела тепла ("повітря-вода", "вода-вода", "ґрунт-вода") та важливість врахування динамічних змін теплового навантаження. Серед підходів до керування ТНУ виділено ПІД-регулювання (з його недоліками щодо нелінійності та інерційності об'єкта), модельно-прогнозуюче керування (МРС) як перспективний підхід, що враховує динамічні зміни та прогнози, а також логічне та релейне керування. Підкреслюється, що переривчасте керування є перспективним підходом для підвищення енергоефективності, мінімізації споживання електроенергії в нічний період та забезпечення комфорту вдень за рахунок завчасного розігріву.

Другий розділ присвячено розробці аналітичної моделі ТНУ, яка є основним інструментом для дослідження її роботи та оптимізації. Аналітичні

моделі базуються на фундаментальних законах термодинаміки, теплопередачі та гідродинаміки, забезпечуючи високу точність, проте вимагають значних обчислювальних ресурсів. Детально описано етапи створення моделі, що включають математичний опис випарника, компресора, конденсатора та розширювального вентиля, з використанням функціональних залежностей для визначення теплофізичних властивостей робочих тіл. Особливу увагу приділено інтеграції програмного пакету CoolProp у MATLAB/Simulink/Simscape, що забезпечує високу точність розрахунків теплофізичних властивостей робочих тіл у реальному часі. Валідація аналітичної моделі шляхом порівняння з експериментальними даними показала високу точність, зокрема, середня абсолютна процентна похибка (MAPE) не перевищувала 10,5%. Однак, основним недоліком аналітичної моделі виявились значні обчислювальні витрати, що робить її непридатною для довготривалих симуляцій (моделювання одного місяця роботи ТНУ займало дві доби обчислень). Через це, у подальших дослідженнях передбачається заміна аналітичної моделі на модель машинного навчання.

У третьому розділі описано розробку та інтеграцію моделі машинного навчання для ТНУ в середовище Simulink. Мета полягала у створенні моделі, яка б поєднувала високу точність аналітичних моделей з низькими обчислювальними витратами. Було проведене порівняння двох підходів: Random Forest та нейронної мережі LSTM. Тестування показало, що LSTM значно перевершує Random Forest у точності прогнозування теплових режимів системи, зменшуючи середню похибку (RMSE) з 48.15 Вт до 25.23 Вт, хоча й потребує більше обчислювальних ресурсів під час навчання. Розробка нейронної моделі включала збір та підготовку тренувальних даних (понад 100 000 записів з аналітичної моделі), вибір архітектури LSTM з одним прихованим шаром та п'ятьма нейронами, а також тренування моделі з використанням алгоритму Adam. Інтеграція моделі в Simulink була реалізована через конвертацію LSTM-моделі у С-код за допомогою бібліотеки 'keras2c' та подальшого впровадження через S-функцію. Це дозволило суттєво прискорити обчислення: середній час виконання одного прогнозу зменшився з $8.45e-02$ с (Python) до $5.2e-05$ с (S-функція). Таким чином, нейронна модель стала придатною для використання в режимі реального часу.

У четвертому розділі розроблено модель системи теплозабезпечення будинку із використанням ТНУ. Основна мета – створення комплексної моделі, що об'єднує ТНУ, систему опалення та будівлю, для відтворення динаміки теплових режимів. Модель враховує конструктивні особливості будівлі, теплофізичні характеристики огорожувальних конструкцій, внутрішні джерела тепла та кліматичні дані (типовий метеорологічний рік). Модель ТНУ реалізована на основі нейронної мережі LSTM, що дозволяє досліджувати динаміку змін режимів роботи установки та системи теплозабезпечення загалом. Важливим етапом є узгодження теплових режимів моделі ТНУ з моделлю будинку, де температура води на виході з ТНУ та її масова витрата є вхідними параметрами для моделі будинку, яка, у свою чергу, генерує сигнал зворотного зв'язку для регулювання режиму роботи компресора. Дослідження динамічних режимів проводиться з використанням ПД-регулятора, який

забезпечує керування температурою теплоносія на виході з ТНУ. Результати тестування моделі підтвердили її ефективність, забезпечивши точність регулювання температури з максимальним відхиленням від уставки до $0,5^{\circ}\text{C}$.

П'ятий розділ присвячено розробці та дослідженню алгоритмів керування переривчастим обігрівом на базі ТНУ. Основна увага приділена розробці адаптивних методів керування, які дозволяють зменшити енергоспоживання в нічний період за рахунок зниження температурної уставки, а також забезпечити необхідний рівень комфорту в приміщеннях до початку робочого дня шляхом завчасного переходу в режим розігріву. Дослідження базувалися на чисельному моделюванні в MATLAB/Simulink із залученням інтегрованих аналітичних і нейронних моделей. Було проведено серію експериментальних досліджень при різних температурах зовнішнього середовища (-10°C , -5°C , 0°C , $+3^{\circ}\text{C}$) для визначення оптимальних параметрів керування (температури нічної уставки та часу включення розігріву). На основі отриманих даних були розроблені поліноміальні моделі для автоматичного розрахунку цих параметрів. Розроблений алгоритм переривчастого керування реалізовано у Simulink, який передбачає три режими роботи: нічний, розігріву та денний. Порівняльний аналіз показав, що впровадження алгоритму переривчастого керування дозволяє знизити споживання електроенергії до 18% у порівнянні з традиційними методами безперервного керування, при цьому забезпечуючи комфортну температуру (19.9°C) до початку робочого дня. Також зазначається, що середня температура теплоносія зменшилася на 14%, що знижує навантаження на обладнання.

У загальних висновках узагальнюються результати дослідження по всіх розділах. Підкреслюється, що ТНУ є перспективним рішенням для енергоефективного теплозабезпечення, а існуючі класичні методи керування не враховують динамічних змін. Розроблена аналітична модель ТНУ показала високу точність, проте мала значні обчислювальні витрати. Цей недолік було усунено за допомогою нейромережевої моделі LSTM, яка перевершила Random Forest за точністю і значно прискорила розрахунки. Запропоновано алгоритм переривчастого керування та адаптивний ПІД-регулятор, які дозволили зменшити витрати енергії до 18% без втрати комфорту.

У додатках міститься Авторське свідоцтво на комп'ютерну програму «Ексергетичне діагностування неполадок у компонентах теплового насосу» №123490 від 05.02.2024 та Акт про використання результатів дисертаційної роботи в навчальному процесі кафедри Автоматизації енергетичних процесів НН ІАТЕ КПІ ім. Ігоря Сікорського.

Дисертаційна робота оформлена відповідно до вимог наказу МОН України від 12 січня 2017 р. № 40 «Про затвердження вимог до оформлення дисертації».

Оприлюднення результатів дисертаційної роботи.

Наукові результати дисертації висвітлені у 9 наукових публікаціях здобувача, серед яких: 4 статті у наукових виданнях, включених на дату опублікування до переліку наукових фахових видань України; 1 авторське свідоцтво на комп'ютерну програму. Також результати дисертації були апробовані на 4 наукових фахових конференціях.

Усі публікації здобувача мають високий науковий рівень. Особистий внесок здобувача до публікацій за співавторством вагомий. Використані ідеї, результати і тексти інших авторів мають належні посилання на відповідне джерело. Принципів академічної доброчесності у жодній з публікацій не порушено.

Кількість та якість публікацій відповідає «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженого постановою КМУ від 12 січня 2022 р. № 44.

Таким чином, наукові результати описані в дисертаційній роботі повністю висвітлені у наукових публікаціях здобувача.

Недоліки та зауваження до дисертаційної роботи.

Дисертаційна робота здобувача має високий науковий рівень та практичну значущість, але разом з тим має деякі недоліки і зауваження:

1. Аналітична модель ТНУ має високу точність, але надмірно ресурсомістка для задач реального часу. Хоча перехід до нейромережевої моделі в наступних розділах вирішує цю проблему, було б доцільно обговорити, чи розглядалися якісь альтернативні стратегії, окрім повної заміни, для зменшення обчислювального навантаження аналітичної моделі, або чи існують специфічні сценарії, де її пряме використання може залишатися необхідним попри це обмеження.

2. Розроблена нейромережева модель з довготривалою короткочасною пам'яттю (LSTM), призначена для скорочення часу обчислень, навчається на даних, «отриманих з аналітичної моделі ТНУ». Такий підхід за своєю суттю означає, що точність нейронної моделі обмежена точністю та репрезентативністю базової аналітичної моделі. Доцільно розглянути використання реальних або гібридних даних для підвищення достовірності результатів.

3. Робота представляє порівняння між алгоритмом Random Forest та нейронною мережею LSTM. З огляду на швидкий розвиток машинного навчання, було б цінно зрозуміти, чи розглядалися інші сучасні або більш спеціалізовані архітектури нейронних мереж, такі як рекурентні нейронні мережі з механізмами уваги або моделі на основі трансформерів, для цього завдання, і чому вибір був звужений до цих двох конкретних моделей.

4. Дисертація зосереджена переважно на загальній моделі ТНУ типу «повітря-вода», і зазначає, що майбутні дослідження можуть включати «адаптацію її до різних типів ТНУ». Варто уточнити, які зміни необхідні для адаптації до систем «грунт-вода» або «вода-вода».

5. Хоча адаптивний ПІД-регулятор реалізований для регулювання температури теплоносія, вступні розділи дисертації визнають фундаментальні обмеження традиційних ПІД-регуляторів, включаючи їх «відсутність механізму врахування теплової інерції будівлі та різних факторів середовища» та схильність до «зростання енерговитрат у разі неправильного налаштування». Було б корисно детальніше роз'яснити, як саме запропонований адаптивний

ПД-регулятор долає ці притаманні недоліки в контексті переривчастого обігріву.

6. Ефективність ПД-контролера підкреслюється підтримкою регулювання температури з «максимальним відхиленням від уставки до $0,5^{\circ}\text{C}$, що є достатнім». Хоча це є прийнятним в рамках цього дослідження, було б доцільно надати більш чітке обґрунтування цього конкретного порогу відхилення. Посилання на встановлені стандарти теплового комфорту в приміщенні (наприклад, ISO 7730 або ASHRAE 55) або обговорення впливу відхилення на $0,5^{\circ}\text{C}$ на мешканців забезпечило б сильнішу зовнішню достовірність цього критерію.

7. Дослідження стверджує, що було «виявлено і кількісно оцінено оптимальні значення параметрів переривчастого обігріву» та виведено поліноміальні моделі для їх розрахунку. Чи можна детальніше пояснити методологію визначення цих оптимальних точок для різних зовнішніх температур та умов експлуатації? Зокрема, чи застосовувався систематичний алгоритм оптимізації, чи ці «оптимальні» значення були отримані в результаті вичерпного моделювання на основі параметричного дослідження?

8. Економія до 18% — вагоме досягнення, але слід надати середні значення по сезону або різних кліматичних умовах, а не лише пікові сценарії.

9. Хоча дисертація успішно інтегрує моделі в MATLAB/Simulink та демонструє їх потенціал для роботи в реальному часі, було б корисно обговорити практичні виклики, пов'язані з реалізацією в реальних умовах. Потрібно згадати можливі труднощі впровадження: вимоги до сенсорів, обладнання, зв'язку, а також ризики кібербезпеки.

10. Для покращення загального сприйняття тексту дисертації варто було б ретельніше вчитати його на предмет окремих орфографічних помилок та стилістичних неточностей.

Вважаю, що висловлені зауваження не є визначальними і не зменшують загальну наукову новизну та практичну значимість результатів та не впливають на позитивну оцінку дисертаційної роботи.

Висновок про дисертаційну роботу.

Вважаю, що дисертаційна робота здобувача ступеня доктора філософії Богзи Миколи Сергійовича на тему «Автоматизація процесу керування адаптивною системою переривчастого теплозабезпечення будинку на базі теплонасосної установки» виконана на високому науковому рівні, не порушує принципів академічної доброчесності та є закінченим науковим дослідженням, сукупність теоретичних та практичних результатів якого розв'язує наукове завдання, що має істотне значення для галузі 15 – *Автоматизація та приладобудування*. Дисертаційна робота за актуальністю, практичною цінністю та науковою новизною повністю відповідає вимогам чинного законодавства України, що передбачені в п.6 – 9 «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 від 12 січня 2022 р. № 44.

Здобувач Богза Микола Сергійович заслуговує на присудження ступеня доктора філософії в галузі знань 15 – Автоматизація та приладобудування за спеціальністю 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології».

Офіційний опонент:

професор кафедри автоматизації
та комп'ютерних технологій систем
управління ім. проф. А.П. Ладанюка
Національного університету харчових
технологій



Наталія ЛУЦЬКА