

## **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 Автоматизація та приладобудування  
за спеціальністю 151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології  
освітньо-наукова програма Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані  
технології

### **Актуальність теми дисертації.**

У сучасних умовах питання енергоефективності набуває особливої актуальності. Постійне зростання цін на енергоносії, вичерпність традиційних джерел енергії (нафти, газу, вугілля), а також екологічні наслідки їх використання змушують суспільство шукати шляхи до зменшення споживання енергії, особливо в побуті. Одним із ключових напрямів енергозбереження є економія енергоресурсів при опаленні житлових будинків, адже саме опалення займає більшу частину загального енергоспоживання у домогосподарствах. Тому пошук підходів до зменшення енергоспоживання є актуальною темою сьогодення.

### **Оцінка обґрунтованості наукових результатів дисертації, їх достовірності та новизни.**

Наукова новизна результатів дисертаційного дослідження полягає в наступному:

1. Вперше виявлено і кількісно оцінено оптимальні значення параметрів переривчастого обігріву будинку на базі ТНУ, які забезпечують підвищення енергетичної ефективності системи керування теплозабезпеченням.
2. Удосконалено систему керування переривчастим обігрівом будинку на базі ТНУ, яка враховує вплив температури зовнішнього середовища, прямої води в умовах зниженого теплового навантаження, прямої води в умовах розігріву, а також часу розігріву і дає можливість знизити споживання електроенергії ТНУ.
3. Удосконалено підходи до інтеграції аналітичних та нейронних моделей у середовищі MATLAB/Simulink за рахунок розроблення спеціальних алгоритмів, що суттєво зменшило затрати машинного часу для імітаційного моделювання динамічних процесів у системах теплозабезпечення.



4. Дістали подальшого розвитку підходи до дослідження впливу типу робочого тіла на характеристики ТНУ за рахунок інтеграції бібліотек з дослідження властивостей робочих тіл в моделі ТНУ, що дало можливість оцінювати ефективність застосування нових типів робочих тіл (зокрема сумішей) на динамічні характеристики ТНУ.

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 теплозабезпечення 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.

Аналіз дисертації свідчить про значну кількість текстових збігів із науковими публікаціями здобувача, що пояснюється використанням результатів, раніше опублікованих у фахових виданнях у межах виконання дисертаційного дослідження. Вказані публікації відображають основні наукові результати дослідження та зазначені в анотації дисертації.



Таким чином, підстав для ствердження про порушення принципів академічної доброчесності у даному випадку немає.

### **Мова та стиль викладення результатів.**

Дисертаційна робота написана українською мовою.

Виклад матеріалу у дисертації відзначається логічною послідовністю, що простежується у структурі розділів, поступовому переході від теоретичних положень до прикладних аспектів дослідження. Кожен розділ логічно пов'язаний із попереднім і відображає етапи наукового пошуку.

Доступність викладення забезпечена завдяки зрозумілому формулюванню положень, чіткому розмежуванню понять, вдалому поєднанню тексту із графічними матеріалами (формули, рисунки, таблиці).

Стиль мовлення відповідає вимогам наукової комунікації — переважає офіційно-науковий стиль із дотриманням норм академічного викладу: без емоційно забарвлених висловів, із застосуванням конструкцій, характерних для опису процесів, моделей і результатів.

Використання термінології здійснюється коректно: переважно застосовуються загальноприйняті технічні та інженерні терміни відповідно до тематики теплонасосних систем і енергетичних досліджень. У разі введення нових понять або специфічних позначень автор подає їхнє пояснення.

Дисертація характеризується стилістичною єдністю, грамотністю викладу та дотриманням академічних стандартів оформлення. Подана інформація структурована належним чином, що сприяє легшому сприйняттю матеріалу.

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

У вступі дисертаційної роботи:

- обґрунтовано актуальність теми, зокрема потребу підвищення енергоефективності систем теплозабезпечення;
- сформульовано мету та завдання дослідження;
- визначено об'єкт і предмет дослідження;
- наведено методи, які використовувалися в роботі;
- окреслено наукову новизну отриманих результатів;
- представлено практичне значення дослідження та його можливе застосування;
- вказано структуру роботи, тобто кількість розділів, рисунків, таблиць, додатків, а також обсяг основного тексту.

У першому розділі дисертації проаналізовано сучасні проблеми автоматизованого керування теплонасосними установками (ТНУ) в системах теплозабезпечення будівель. Розділ обґрунтовує актуальність підвищення



енергоефективності через оптимізацію алгоритмів керування, зокрема в умовах переривчастого режиму обігріву.

Також розглянуто доцільність використання математичного моделювання (у середовищі Matlab/Simulink/Simscape) для прогнозування теплових режимів, і підкреслено важливість точного налаштування температурних параметрів у нічний час для збереження комфорту та зниження споживання енергії.

У другому розділі дисертації представлено розробку аналітичної моделі теплонасосної установки (ТНУ), яка використовується для дослідження її роботи, оцінки ефективності та оптимізації режимів експлуатації.

Розділ містить аналіз сучасних підходів до моделювання ТНУ - аналітичних, емпіричних та гібридних - з акцентом на їх переваги, недоліки та доцільність використання. Детально описано процес побудови аналітичної моделі на основі фізичних законів, а також математичне моделювання ключових компонентів ТНУ. Особливу увагу приділено точному визначенню теплофізичних властивостей робочих тіл та інтеграції моделі в середовище MATLAB/Simulink. Розроблена модель має модульну структуру та дозволяє проводити динамічне моделювання роботи ТНУ, а також перевірена за допомогою експериментальних даних для оцінки точності й надійності розрахунків.

У третьому розділі дисертації описано розробку та впровадження моделі машинного навчання для теплонасосної установки (ТНУ) у середовище Simulink. Основна мета — підвищення швидкодії моделювання та адаптація до змінних умов експлуатації, що обмежено у класичних аналітичних моделях.

Порівняно два підходи — Random Forest і нейронну мережу LSTM; обрано LSTM через її здатність працювати з часовими рядами та високою точністю прогнозування. Розроблена модель тренувалася на даних аналітичної моделі ТНУ, потім була оптимізована та інтегрована у Simulink.

Проведене тестування підтвердило точність і продуктивність моделі, а запропонований підхід довів ефективність поєднання нейромереж із традиційним моделюванням для задач управління ТНУ в реальному часі.

У четвертому розділі дисертації представлено розробку інтегрованої моделі системи теплозабезпечення будинку, яка об'єднує теплонасосну установку (ТНУ), систему опалення та саму будівлю. Мета — моделювання динаміки теплових процесів з урахуванням зовнішніх кліматичних умов і внутрішніх теплових навантажень.

Модель враховує конструктивні особливості будинку, теплофізичні властивості огорожувальних конструкцій та використовує кліматичні дані типового метеорологічного року. Нейромережева модель ТНУ (LSTM) інтегрована з моделлю опалення, що дозволяє досліджувати їх взаємозв'язок і



забезпечувати тепловий комфорт завдяки ПІД-регулятору, налаштованому у MATLAB/Simulink.

Результати симуляцій підтвердили високу точність регулювання температури (максимальне відхилення — до  $0,5^{\circ}\text{C}$ ) та ефективність системи. Розроблена модель є основою для створення інтелектуальних систем управління теплозабезпеченням, здатних адаптуватися до змін і сприяти енергозбереженню та декарбонізації.

У п'ятому розділі дисертації представлено розробку та дослідження алгоритмів керування переривчастим обігрівом будівлі на базі теплонасосної установки (ТНУ). Основна увага зосереджена на адаптивних методах управління, які дозволяють зменшити енергоспоживання в нічний час і забезпечити комфортну температуру зранку за рахунок завчасного розігріву.

У середовищі MATLAB/Simulink реалізовано інтегровану модель, яка враховує теплофізичні властивості будівлі, роботу ТНУ та керуючі алгоритми. Проведено численні моделювання для різних сценаріїв, що дозволило визначити оптимальні параметри температурної уставки та часу розігріву.

Результати показали, що застосування переривчастого керування може зменшити енергоспоживання до 18%, не погіршуючи тепловий комфорт. Додатково знижується середня температура теплоносія, що зменшує навантаження на обладнання. Таким чином, запропоновані алгоритми є ефективним інструментом для енергетичної оптимізації систем теплозабезпечення.

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.

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

### **Недоліки та зауваження до дисертаційної роботи.**

1. У моделюванні ТНУ в Simulink використовується взаємодія кількох підсистем (рис. 1.6), але не показано залежності якими описуються: теплове навантаження будівлі, ТНУ, система управління.



2. Для моделювання роботи системи теплозабезпечення важливо враховувати зовнішні фактори, такі як температура зовнішнього повітря та сонячна радіація, але на рис 1.7 враховано тільки вплив температури навколишнього середовища і відсутня інформація про походження даних, які наведені на графіку.
3. По всій дисертації відображено тільки загальні моделі систем в Simulink, але не відображено підсистем в яких реалізовано моделі окремих елементів системи, що утруднює аналіз відповідних результатів.
4. Досить часто в роботі зустрічаються стилістичні огріхи, описки тощо, так, наприклад: на рис 1.1 не зрозуміло по якій шкалі оцінюється ефективність водяних нагрівачів; на рис 1.6 зображення поганої якості, що не дозволяє прочитати назви параметрів; не зрозуміло де взялася залежність 1.5 температури прямої води від зовнішньої температури, що відображена на рис 1.7; на рис 2.2 Gwater не зрозуміло куди під'єднано та звідки береться Twaterin, Twaterout; рис 4.2 та 4.3 містять однаковий підпис....
5. Враховуючи галузь знань і спеціальність за якою виконана робота, варто було би більшої уваги приділити на програмно-технічну реалізацію процесу керування адаптивною системою переривчастого теплозабезпечення будинку.
6. В наведеному переліку літературних джерел майже відсутні праці українських дослідників, що наштовхує на думку про недостатній аналіз досліджень в напрямку застосування теплонасосних установок та керування ними.

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 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

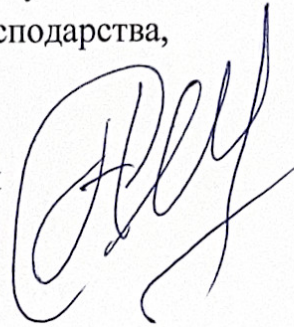


філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. № 44.

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:**

директор навчально-наукового інституту  
енергетики, автоматики та водного господарства,  
д.т.н., проф.,  
Національний університет водного  
господарства та природокористування



Андрій САФОНИК

М.П.

02.07.2025 року