

## ВІДГУК

офіційного опонента на кваліфікаційну наукову працю

**Свердлової Анастасії Дмитрівни**

**«Інформаційно-вимірювальна система діагностування складних теплоенергетичних об'єктів із використанням ретроспективної інформації»**,

подану на здобуття наукового ступеня доктора філософії  
за спеціальністю 152 Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка

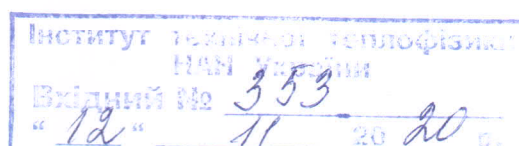
### **Актуальність теми.**

На сучасному етапі розвитку промисловості та техніки забезпечення їх безперебійної та узгодженої експлуатації з іншими об'єктами мережі складних теплоенергетичних об'єктів (СТО) потребує контролю використання теплових ресурсів і особливо за непродуктивними витратами. Для цього необхідно, з однієї сторони, застосування енергозберігаючих технологій та матеріалів, а з іншої, проведення неперервного контролю, моніторингу та діагностування фактичного технічного стану СТО. Одночасне застосування енергозберігаючих технологій та матеріалів на всіх об'єктах СТО вимагає залучення великих коштів, яких в Україні просто бракує. Другий шлях передбачає визначення фактичного технічного стану об'єктів СТО, на основі створення та застосування сучасних засобів отримання поточної та ретроспективної інформації, що може бути використано при порівнянні прогнозованих експлуатаційними показниками з поточними значеннями для СТО. Істотно, що такими засобами є системи моніторингу та технічного діагностування СТО, які на основі отримання та аналізу актуальної вимірювальної інформації про поточний стан СТО здатні забезпечити їх надійну експлуатацію, високий рівень автоматизації процесу управління СТО та оперативне реагування на можливі критичні передаварійні стани таких об'єктів.

Враховуючи вищесказане, актуальність теми дисертаційної роботи Свердлової А.Д., яку присвячено створенню інтелектуальної розподіленої багаторівневої системи моніторингу стану та діагностики СТО, в якій прийняття діагностичних рішень ґрунтується на аналізі не тільки поточної, але й ретроспективної інформації про стан СТО, не викликає сумнівів.

**Обґрунтованість та достовірність отриманих результатів.** Положення та висновки дисертаційної роботи.

Основні наукові результати дисертаційної роботи загалом є достатньо обґрунтовані теоретичними і модельними дослідженнями та експериментально. Їх достовірність забезпечується коректній постановці мети та завдань дослідження, використанні перевірених вихідних даних, використанням сучасних теорій та сучасних програмних продуктів, комплексним характером досліджень,



узгодженістю отриманих результатів з даними інших авторів (де це порівняння можливе), обговоренням висунутих наукових положень та зроблених висновків на міжнародних та вітчизняних науково-технічних конференціях, логічному та чіткому формулюванні їх результатів, на підтвердженні теоретичних висновків щодо запропонованих технічних рішень і очікуваних властивостей розроблюваних приладів метрологічними дослідженнями.

В роботі коректно використовуються положення теоретичних основ інформаційно-вимірювальної техніки та структурно-алгоритмічні методи підвищення точності і розширення функціональних можливостей вимірювальних приладів, теорія похибок, нейромережеві технології, моделювання та розрахунки характеристик ТЕП.

**Наукова новизна та значення результатів досліджень.** Основні наукові положення, висновки і рекомендації, отримані автором і представлені в дисертації, безпосередньо пов'язані з метою досліджень і полягають у наступному:

- розвинуто моделі векторного випадкового процесу, що описують динаміку інформаційних полів за фіксованих просторових координат в складних теплоенергетичних об'єктах (СТО), що дало змогу визначити параметри діагностування елементів СТО та обґрунтувати загальні вимоги до систем діагностування;

- розвинуто методи прогнозування аномальних станів СТО з використанням алгоритмів глибинного навчання з архітектурами LSTM і автокодувальника;

- обґрунтовано метод діагностування елементів СТО, який базується на застосуванні поточної та ретроспективної інформації і дає змогу порівнювати прогнозовані показники з поточними даними експлуатації СТО;

- розроблено метод прогнозування відмов елементів СТО в умовах малої кількості аномальних відхилень, що дало змогу підвищити вірогідність прогнозування.

Практичне значення результатів роботи полягає у наступному:

- розроблено інформаційно-вимірювальну систему діагностування (ІВСД) із застосуванням нейромережевої технології, що дає змогу оцінювати поточний стан СТО, вчасно виявляти аномальні стани, запобігати можливим вимушеним відключенням, передбачати та планувати заходи з їх технічного обслуговування;

- розроблено структуру, виготовлено та експериментально перевірено дослідний зразок модулю багаторівневої системи діагностування елементів СТО, до складу якого входять сенсори різних типів;

- розроблено апаратно-програмне забезпечення багаторівневої системи діагностування, що базується на використанні бездротових сенсорних мереж та mesh-топології для передачі даних;

- створено ряд моделей (модифікацій нейронних мереж) для аналізу поточних та ретроспективних даних за температурою поверхні котлів, які проаналізовані за різних параметрів сигналів.

**Основні результати** теоретичних і експериментальних досліджень автора впроваджені та знайшли практичне застосування в ТОВ НВП «Машинобудування» (м. Дніпро) при розробленні методу та структури системи діагностування теплотехнічного обладнання, що базується на технології Smart Grid (акт від 22.11.2016), при розробленні математичних моделей добору діагностичних ознак, що характеризують стан конструктивних елементів теплоенергетичних об'єктів та створенні структури вимірювального модуля системи діагностування теплоенергетичного обладнання (акт від 23.11.2017).

**Структура дисертації та зміст розділів.** Дисертація складається з анотації, публікацій здобувача за темою роботи, змісту, переліку умовних позначень і скорочень, основної частини, що включає вступ, 4 розділи та висновки, списку використаних джерел, який містить 133 найменування та 5 додатків. Загальний обсяг дисертації складає 156 сторінок, з яких основний текст викладено на 121 сторінках.

**У вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертації, вказані мета і завдання досліджень, сформульовано наукову новизну та практичне значення отриманих результатів, показано зв'язок з виконаними НДР, особистий внесок здобувача в публікаціях, представлена інформація з апробації, реалізації і впровадження результатів роботи.

**У першому** вказано, що переважна більшість котелень підприємств комунальної теплоенергетики виробило свій ресурс, а їх загальний технічний стан оцінюється, як незадовільний. Проаналізовано інформацію із відкритих джерел, щодо аварій на котлоагрегатах за останні роки та причини, що їх викликали. У роботі проведено порівняльний аналіз традиційні методи діагностування та неруйнівного контролю складників СТО. Показано переваги прогнозованого обслуговування перед реактивним або профілактичним. Розглянуто принципи Smart Grid в інфраструктурі СТО, показана відмінність від традиційного підходу до обслуговування СТО.

За результатами проведеного аналізу сформульовано актуальне науково-технічне завдання та задачі дослідження.

**У другому** розділі конкретизовано основні напрями дослідження, запропоновано функціональну схему процесу діагностування та загальну математичну модель динамічних змін у часі значень вимірювальних параметрів у вигляді векторного випадкового поля за фіксованих просторових координат, досліджено методи інтелектуального аналізу даних для прогнозування та бінарної класифікації часових рядів, розглянуто методи виявлення аномалій, описано режими

розпізнавання «з вчителем», «частково з вчителем» та «без вчителя». Показано, що одними з найбільш широко вживаними механізмами реалізації розпізнавання аномалій за допомогою класифікації є нейронні мережі.

Проаналізовано методи виявлення аномалій за допомогою нейронних мереж, їх переваги та недоліки. Запропоновано та обґрунтовано використання архітектури нейронної мережі з довгою короткочасною пам'яттю LSTM, що дає змогу реалізувати точну керовану даними систему.

**Третій** розділ присвячено розробленню апаратних та програмних складників ІВСД. Запропоновано ієрархічну структуру системи технічного діагностування СТО на основі концепції Smart Grid, що дає змогу проводити: первинний збір та підготовку діагностичних сигналів; первинне математичне опрацювання, прийняття первинних діагностичних рішень з метою попередження про розвиток можливих дефектів; накопичення, повноцінне опрацювання та глибокий аналіз даних, швидке реагування на аварійні сигнали з нижчого рівня системи, прийняття діагностичних рішень щодо об'єкта в цілому, архівацію статистичних даних. Перевагами запропонованої структури є: багаторівневність; імплементовані принципи Smart Grid; реалізація системи у вигляді розподіленого модульного комплексу; можливість використання як дротових, так і бездротових технологій передавання даних.

Розроблено електричну схему вимірювального модуля, до якого можуть бути підключені сенсори фізичних величин, які використовуються під час діагностування стану елементів СТО: магнітні, вібраційні, температурні, наявності твердих часток, контролю концентрації різних речовин тощо. Розроблена узагальнена структура вимірювального каналу для контролю температури поверхні котлоагрегату, на основі якої обрано застосування модулю термопари К-типу.

Розроблено програмне забезпечення, що складається з програмних пакетів нижнього рівня, верхнього рівня, збору та реєстрації даних, яке дає змогу уніфікувати формати даних та протоколів обміну даними для різних типів сенсорів і засобів зв'язку підсистем та між ними. Застосування протоколів для створення самоорганізованої мережі дає змогу представити ІВСД як модульну систему, що забезпечує додавання нових і видалення застарілих модулів із системи без її повної рекомпіляції.

**Четвертому** розділі приведено результати експериментальних досліджень моделей нейронних мереж та ІВСД. Сформована варіація навчальних параметрів для моделей нейронних мереж із різними навчальними періодами, кількістю прихованих шарів та нейронів. Розроблено програму навчання нейронних мереж.

Наведено критерії оцінювання моделей нейронних мереж на основі коефіцієнту детермінації  $R$ . Виконано валідацію та перевірку розроблених моделей нейронних мереж. Показано, що навчальний період в один місяць є занадто коротким, щоб мережа повністю ідентифікувала особливості процесу. Моделі з

навчальним періодом 4 місяці мають кращі характеристики прогнозування, проте продуктивність моделей із навчальним періодом 12 місяців вище. Точність моделей зростає із додаванням двох прихованих шарів. Модель з періодом навчання 12 місяців, 4 прихованими шарами та 90 прихованими нейронами мала високий коефіцієнт детермінації ( $0,85 < R^2 \leq 1,0$ ) та була обрана в якості еталонної моделі. Це дало змогу прогнозувати аномальний стан СТО на основі вимірювання температури поверхні теплоенергетичного обладнання з високою достовірністю.

У системі реалізовано метод діагностування та прогнозування технічного стану СТО, який базується на врахуванні поточної і ретроспективної інформації, що дало змогу порівнювати прогнозовані показники з поточними, а також враховувати попередні дані експлуатації СТО. Перевірка результатів експериментального дослідження системи прогнозування відмов обладнання в реальних умовах показала збільшення достовірності прогнозування аномальних станів на 9 %.

Обґрунтовано, що метрологічне забезпечення вимірювань із застосуванням ІВСД базується на встановленні метрологічних характеристик її вимірювальних каналів. Основним методом визначення метрологічних характеристик вимірювальних каналів є розрахунковий, що включає оцінювання метрологічних характеристик їхніх компонентів.

У **додатках** наведено акти впровадження результатів наукової роботи, елементи розробленого програмного забезпечення для створеної ІВСД.

**Висвітлення результатів дисертації в опублікованих працях.** Основні наукові результати дисертації викладено у 10 наукових публікаціях, серед них 4 статті – у наукових фахових виданнях України, 1 стаття – у закордонному виданні держави, яка входить до Європейського Союзу, 1 публікації – у виданнях, що входять до міжнародної наукометричної бази даних SCOPUS.

**Апробація результатів дисертації.** Результати досліджень оприлюднено в 4 доповідях на наукових конференціях.

**Оформлення** кваліфікаційної роботи. Робота написана українською мовою на високому науково-професійному рівні, містить важливі наукові положення, які характеризуються новизною і корисністю, а також практичні результати, що знайшли застосування в промисловості та в науково-дослідних організаціях. Рівень досліджень та глибина розгляду питань відповідає вимогам до кваліфікаційних наукових праць на здобуття наукового ступеня доктора філософії. Оформлення роботи відповідає вимогам «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого постановою Кабінету міністрів України № 567 від 24.07.2013 (п.п. 9,10,12,13) та ДСТУ 3008-95 «Документація. Звіти у сфері науки і техніки. Структура і правила оформлення».

## **Зауваження і питання по кваліфікаційній роботі**

До змісту кваліфікаційної роботи є наступні зауваження і питання.

1. Представлені в роботі завдання є не чітко сформульованими:
  - "мінімізації впливу роботи об'єктів теплоенергетики на довкілля" не вказано, саме які впливи буду мінімізовані, тобто яка цільова функція проведення мінімізації;
  - "підвищення ефективності роботи об'єктів теплоенергетики як загалом, так і їх певних ланок – генеруючих, теплових мереж, розподільчого обладнання, об'єктів теплоспоживання" не зовсім зрозуміло в чому полягає підвищення ефективності.
2. В роботі в розділі "Практична цінність одержаних результатів" зазначено, що "..... до складу якого можуть входити сенсори різних типів, кількість яких обмежена тільки числом шин зв'язку...." але зазвичай кількість сенсорів обмежується не числом шин зв'язку, а практичною необхідністю в отриманні контрольних-діагностичних параметрів, що дозволять всебічно та достовірно провести діагностування.
3. В роботі не вказані динамічні характеристики розробленої системи в залежності від можливих чинників, що впливають на швидкість реакції при її використанні в штатному режимі при різних добових навантаженнях та в нештатних ситуаціях.
4. В роботі зустрічається різне трактування для складових ІВСД, так наприклад: "вимірювальні модулі" та "сенсорна підсистема" для визначення блоку сенсорів.
5. В роботі не чітко вказано, чому саме для реалізації вимірювального каналу ІВСД використано термопара К-типу (хромель-алюмель), а не іншого типу?
6. Із роботи не ясно які вимоги висуваються до підсистем розробленої ІВСД "опрацювання та обробки даних", "первинної обробки даних" та реєстрації даних"?
7. Не зовсім зрозумілий висновок підрозділу 4.2 "У результаті встановлено, що для діагностування стану СТО необхідно обґрунтувати та побудувати таку модель, яка забезпечує виявлення аномалії з мінімальною кількістю помилкових сигналізацій під час роботи в нормальному стані", який більше підходить до розділу задач дослідження.
8. В роботі приведені похибки складових системи але не має розрахунку загальної похибки ІВСД.
9. З тексту роботи не чітко ясно, чи є задовільними отримані показники із виявлення аномалій, що приведені, а саме: "9 % аномалій зафіксовані за 4 години до реальних відмов", "17 % аномалій зафіксовані менш ніж за 4

години до відмови" та "32 % зафіксованих аномалій виявлені під час відмови".

10. Перелік умовних позначень та скорочень оформлений без дотримання алфавітного порядку, що затрудняє пошук по ньому.

11. По тексту роботи зустрічаються деякі орфографічні, стилістичні та граматичні помилки.

**Загальний висновок.** Кваліфікаційна наукова робота Свердлової А. Д. є завершеною науковою працею, присвяченою вирішенню важливої науково-технічної проблеми, яка полягає в удосконаленні процесу діагностування технічного стану складних теплоенергетичних об'єктів за допомогою розроблення моделей, методів діагностування стану теплоенергетичних об'єктів та ІВСД із застосуванням нейромережових технологій, що їх реалізує та забезпечує дистанційне прогнозування можливого виникнення аномального стану з урахуванням поточної та ретроспективної інформації.

Робота повністю відповідає спеціальності 152 – Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка. За сукупністю отриманих наукових результатів, їх актуальністю, новизною, обґрунтованістю, достовірністю та практичною цінністю кваліфікаційна наукова праця відповідає вимогам діючого «Порядку присудження наукових ступенів», а її автор Свердлова Анастасія Дмитрівна заслуговує присудження наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 152 – Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка.

Старший науковий співробітник  
відділу електричних і магнітних вимірювань  
Інституту електродинаміки НАН України,  
д.т.н., с.н.с.

Є.О. Зайцев

Підпис засвідчую  
Вчений секретар  
Інституту електродинаміки  
НАН України



О.Г. Кофто