

ВІДГУК

офіційного опонента на кваліфікаційну наукову працю

Свердлової Анастасії Дмитрівні

«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. Сучасний стан технологічного розвитку суспільства характеризується високим рівнем енергоспоживання, розгалуженістю мережі складних теплоенергетичних об'єктів (СТО). Вимогою їх безаварійної та узгодженої експлуатації є отримання актуальної інформації про фактичний стан кожного елемента СТО та обмін цією інформацією між учасниками процесу генерування та передавання теплоносія. Вирішення цієї задачі вимагає створення багаторівневої системи моніторингу та технічного діагностування СТО, яка на основі отримання та аналізу актуальної вимірювальної інформації про поточний стан СТО здатна забезпечити їх надійну експлуатацію, високий рівень автоматизації процесу управління СТО та оперативне реагування на можливі критичні передаварійні стани таких об'єктів.

Однією з найбільших загроз для нормального функціонування СТО є їх аномальні стани, пов'язані з появою та розвитком різних несправностей. Такі події мають рідкий нерегулярний характер, що ускладнює їх виявлення. Підвищити вірогідність їх вчасного виявлення та попередження аварій можна шляхом використання ретроспективної інформації про стан СТО. Саме розвитку цього актуальний напряму, пов'язаного зі створенням інтелектуальної розподіленої багаторівневої системи моніторингу стану та діагностики СТО, в якій прийняття діагностичних рішень ґрунтуються на аналізі не тільки поточної, але й ретроспективної інформації про стан СТО, присвячена робота Свердлової А.Д.

Обґрунтованість та достовірність отриманих результатів. Положення та висновки дисертаційної роботи достатньо обґрунтовані теоретичними і модельними дослідженнями та експериментально. Ця оцінка базується на коректній постановці

інституту
Факультету фізики
Виданий № 350
“10” 11 2020 р.

мети та завдань дослідження, використанні перевірених вихідних даних, застосуванні адекватних методів досліджень, логічному та чіткому формулюванні їх результатів, на підтвердження 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 нейромережової 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 165 сторінок, з яких основний текст викладено на 131 сторінках.

У вступі обґрутовано 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 загальний технічний стан котелень підприємств комунальної теплоенергетики характеризується значним рівнем зношування і наближається до критичного стану. Проаналізовано доступну інформацію щодо аварій на котлоагрегатах за останні роки та причини, що сприяли виникненню дефектів. Розглянуто традиційні методи діагностування та неруйнівного контролю складників СТО. Проведено порівняльний аналіз видів обслуговування теплоенергетичного обладнання, показано переваги прогнозованого обслуговування перед реактивним або профілактичним, розглянуто принципи Smart Grid в інфраструктурі СТО. За результатами проведеного аналізу сформульовано актуальне науково-технічне завдання та задачі дослідження.

У другому розділі і запропоновано функціональну схему процесу діагностування, конкретизовано основні напрями дослідження, запропоновано загальну математичну модель динаміки 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 апаратної та програмної складників ІВСД. Запропоновано ієрархічну структуру системи технічного діагностування СТО на основі концепції Smart Grid, що дає змогу проводити: первинний добір та підготовку діагностичних сигналів; первинне математичне опрацювання, прийняття первинних діагностичних рішень та попередження про можливі дефекти; 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: багаторівневість; 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 підключенні 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 термопарі 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.

Четвертий розділ присвячено експериментальному дослідженню 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 IBCД 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 програмних засобів розробленої системи з їх описом.

Висвітлення результатів дисертації в опублікованих працях. Основні наукові результати дисертації викладено у 10 наукових працях, серед них 4 статті – у наукових фахових виданнях України, 1 стаття – у закордонних виданнях, 1 стаття – у виданні, що входить 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 наукова праць на здобуття наукового ступеня доктора філософії. Оформлення роботи відповідає діючим вимогам.

Зауваження і питання по кваліфікаційній роботі

До змісту кваліфікаційної роботи є наступні зауваження і питання.

1. В п. 2.5 зазначено, що першим кроком алгоритму виявлення аномалій є розбиття часових рядів на рівні за обсягом послідовності. В той же час відомо, що теплоенергетичні процеси (відповідно і отримані за їх спостереженням часові ряди) характеризуються певною циклічністю, наприклад, добовою, сезонною. Чи потрібно враховувати циклічність процесів у СТО в розбитті вибірок?
2. Як швидко може реагувати розроблена ІВСД на виникнення аномальних станів СТО? Які чинники впливають на швидкість реакції системи на виникнення нештатних ситуацій в роботі СТО?
3. Частину матеріалу розділу 3, що має суто інженерний характер (до прикладу інформацію про друковані плати) без втрат для цілісного сприйняття роботи, можна було перенести у додатки.
4. Стосовно формулювання змісту роботи є такі зауваження:
 - хоча змістовне наповнення розділів 1 і 2 суттіво відрізняється, вони мають близькі назви: «Розділ 1. Аналіз методів та засобів діагностування складних теплоенергетичних об'єктів»; «Розділ 2. Методи діагностування складних теплоенергетичних об'єктів»;
 - розділ 4 має назву «Побудова та експериментальні дослідження», не вказано предмет дослідження (дослідження чого?);
 - хоча розділ 1 і включає 9 підрозділів, вимірювальному та метрологічному аспектам створення ІВСД не приділено належної уваги.
5. З тексту роботи не зрозуміло якій фізичний зміст мають наведені в табл. 4.4. дані.
6. Які вимоги висуваються до засобів обчислювальної техніки на різних рівнях ієрархії розробленої ІВСД?
7. По тексту роботи зустрічаються помилки, до прикладу,
 - у першій формулі на стор 63 замість Δ вказано літеру n ;
 - на стор.118 для визначення меж довірчого інтервалу використано обсяг вибірки M , а для обчислення відповідного коефіцієнта Стьюдента – $N-1$.

Загальний висновок. Вищевказані дискусійні питання не впливають на

загальну позитивну оцінку виконаного дисертаційного дослідження, не зменшують його наукову новизну та практичну значущість.

Вважаю, що дисертаційна робота Свердової А. Д. є завершеною науковою працею, присвяченою вирішенню важливої науково-технічної задачі, яка полягає в удосконаленні процесу діагностування технічного стану складних теплоенергетичних об'єктів за допомогою розроблення моделей, методу та IBCD стану теплоенергетичних об'єктів, що забезпечують прогнозування його аномального стану з урахуванням поточної та ретроспективної інформації та використанням нейронних мереж. Робота є завершеним науковим дослідженням та відповідає вимогам п.п. 9-11 «Порядку проведення експерименту з присудженням ступеня доктора філософії», затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України № 167 від 6 березня 2019 р. та Наказом МОН України № 40 від 12 січня 2017 р. «Про затвердження Вимог до оформлення дисертацій», а її автор, Свердлова Анастасія Дмитрівна, продемонструвавши достатній рівень наукової кваліфікації, заслуговує на присудження їй ступеня доктора філософії в галузі знань 15 Автоматизація та приладобудування за спеціальністю 152 Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка.

Професор кафедри

приладів та систем неруйнівного контролю

Національного технічного університету України

«Київський політехнічний інститут

імені Ігоря Сікорського»,

д.т.н., професор

Ю.В. Куц · Ю.В. Куц

Підпис засвідчує

Вчений секретар

КПІ ім. Ігоря Сікорського

В.Хол · В.В. Холявко

