

ВІДГУК
офіційного опонента Савенка Олега Станіславовича

на дисертаційну роботу

Щеглова Владислава Романовича

на тему «Моделі, метод та засоби інтелектуальної системи діагностування
промислового обладнання з використанням індустріального інтернету речей і
цифрових двійників»,

подану на здобуття ступеня доктора філософії

у галузі знань 12 Інформаційні технології

за спеціальністю 123 Комп'ютерна інженерія

Актуальність теми дисертації.

Розвиток сучасних промислових кіберфізичних комплексів та систем індустріального інтернету речей (ІІІТ) нерозривно пов'язаний із переходом до інтелектуальних методів управління надійністю та масовим впровадженням стратегій технічного обслуговування за технічним станом. Складне промислове обладнання потребує безперервного моніторингу технічного стану, оскільки непередбачувані відмови та критичні дефекти можуть призвести до катастрофічних наслідків, зупинки технологічних процесів та значних економічних втрат. В цих умовах використання інструментів штучного інтелекту, зокрема нейронних мереж та методів машинного навчання, стає невід'ємною складовою для забезпечення високої експлуатаційної готовності та виявлення аномалій у режимі реального часу. Водночас традиційні підходи до діагностування, що спираються на статичні моделі або жорсткі допуски, швидко вичерпують свій потенціал в умовах змінного середовища, старіння компонентів та появи нових, неспецифікованих дефектів. Тому, виникає гостра суперечність між об'єктивною необхідністю забезпечення високого рівня готовності та безпечності промислового ІІІТ-обладнання, параметри якого постійно змінюються, та обмеженими можливостями існуючих систем діагностування. Статичні підходи не здатні самостійно адаптуватися, що неминуче призводить до накопичення прихованих відмов та суттєвого зниження точності оцінювання надійності. Перспективним напрямом вирішення цієї проблеми є інтеграція методів машинного навчання та технологій цифрових двійників, що дозволяють створити адаптивні інтелектуальні системи діагностування, які здатні до оперативного додаткового самонавчання на основі накопичених даних телеметрії.

Дисертаційна робота Щеглова В. спрямована на розроблення моделей, методу та засобів інтелектуальної системи діагностування промислового

обладнання з використанням індустріального інтернету речей і цифрових двійників, є актуальною. Запропоновані здобувачем підходи створюють надійне підґрунтя для виявлення прихованих дефектів, підвищення достовірності діагностування та забезпечення процедур технічного обслуговування за технічним станом для промислового обладнання IIoT.

Оцінка обґрунтованості наукових результатів дисертації, їх достовірності та новизни.

Проведений аналіз дисертаційної роботи дозволяє зробити висновок про належний рівень обґрунтованості отриманих результатів. Автор застосував апарат теорії надійності, теорії множин, марковських ланцюгів з неперервним часом, структурно-автоматних моделей, а також сучасні концепції штучного інтелекту та машинного навчання.

Сформульоване в роботі наукове завдання вирішено повною мірою, що свідчить про необхідний рівень володіння здобувачем методологією наукових досліджень.

Наукова новизна результатів дисертаційного дослідження полягає в наступному:

1) вперше запропоновано теоретико-множинну модель та архітектуру інтелектуальної системи діагностування промислового обладнання систем індустріального інтернету речей, яка формалізує процеси локального та федеративного донавчання цифрового двійника, зокрема його нейромережевих компонентів, для динамічного обчислення функції готовності та коригування параметрів оперативного контролю на базі виявлених критичних дефектів;

2) удосконалено базові та мультифрагментні моделі готовності відновлювального обладнання, що утворюють множину на базі розробленого онтологічного класифікатора та враховують зміну достовірності діагностування після відмов, створюючи точний базис для реалізації стратегій технічного обслуговування за технічним станом;

3) удосконалено метод верифікації та валідації марковських моделей систем діагностування шляхом застосування багатоступеневої перехресної перевірки та урахування математичної «жорсткості» матриць інтенсивностей переходів для мінімізації обчислювальних похибок, що є основою для систем предиктивної аналітики.

Достовірність результатів підтверджується коректним застосуванням апарату системного аналізу, теорії ймовірностей і марковських випадкових процесів, теоретико-множинних і структурно-автоматних моделей, а також методів онтологічного інжинірингу. Адекватність отриманих результатів

верифікована шляхом симуляційного моделювання за допомогою марковський моделей, обґрунтованою підготовкою вхідних параметрів для симулювання та отриманням очікуваної поведінки роботи цих моделей.

Цінність роботи визначається успішним розв'язанням актуального науково-прикладного завдання щодо розроблення моделей, методу та засобів для інтелектуального діагностування і забезпечення надійності промислового ПоТ-обладнання за допомогою технологій цифрових двійників з можливостями донавчання. Запропонований автором комплексний підхід створює наукове підґрунтя для впровадження, крім класичних статичних методів й адаптивного предиктивного оцінювання готовності. Це дозволяє математично формалізувати процеси зростання достовірності діагностування алгоритмами ШІ, ефективно виявляти критичні дефекти та мінімізувати ризики накопичення прихованих відмов.

Практична цінність дисертації посилюється тим, що отримані теоретичні здобутки доведено до стадії прикладного використання у вигляді еталонної ІТ-архітектури розгортання та спеціалізованого інструментарію предиктивної аналітики («R-SIM»). Працездатність та результативність запропонованих рішень підтверджуються їх успішним впровадженням на підприємстві ТОВ «НВП «РАДІКС» (для оптимізації процесів верифікації та валідації інформаційно-керуючих систем малих модульних реакторів), а також їх застосуванням в освітньому процесі та під час виконання низки державних науково-дослідних робіт у Національному аерокосмічному університеті «ХАІ».

Отже, в дисертаційній роботі поставлене наукове завдання 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 Щеглова В. повністю відповідає Стандарту вищої освіти зі спеціальності **123 Комп'ютерна інженерія** та напрямкам досліджень відповідно до освітньої програми «Комп'ютерна інженерія».

Дисертаційна робота є завершеною науковою працею і свідчить про наявність особистого внеску здобувача у науковий напрям «Інформаційні технології».

Розглянувши звіт подібності за результатами перевірки дисертаційної роботи на текстові збіги, можна зробити висновок, що дисертаційна робота Щеглова В. 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 викладена українською мовою з чітким дотриманням вимог академічного наукового стилю. Матеріал структуровано логічно та послідовно. Автор здійснив коректний перехід від дослідження предметної області, аналізу проблематики технічного обслуговування і постановки задачі до розроблення адаптивних математичних моделей, а згодом і до їх експериментальної валідації. Складні теоретичні аспекти, пов'язані з розробленням інтелектуальних систем, подано доступно, супроводжуючись вичерпними поясненнями, посиланнями, результатами симуляцій та відповідними діаграмами та графіками.

Здобувач вільно та коректно оперує сучасною термінологією у предметній області штучного інтелекту, індустріального інтернету речей, машинного навчання та технічного обслуговування. Загалом стиль викладення відзначається достатнім рівнем наукової зрілості, точністю формулювань та аргументованістю.

Оформлення та відповідність вимогам. Робота повністю відповідає чинним вимогам Міністерства освіти і науки України щодо оформлення дисертацій (Наказ № 40 від 12.01.2017 р.).

Структура роботи

Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Загальний обсяг дисертації становить 225 сторінок, з яких основний текст займає 182 сторінки.

У вступі обґрунтовано актуальність теми, сформульовано науково-прикладне завдання, мету, об'єкт і предмет дослідження, наведено методи дослідження, а також відображено наукову новизну і практичне значення отриманих результатів.

У першому розділі проведено ґрунтовний аналіз сучасного стану проблеми забезпечення надійності промислового ІоТ-обладнання та доведено необхідність залучення інструментів штучного інтелекту і цифрових двійників з донавчанням для своєчасного виявлення прихованих відмов.

У другому розділі розроблено теоретико-множинну модель та архітектуру інтелектуальної системи діагностування, а також формалізовано онтологічний класифікатор, що слугує системною базою знань для побудови комплексу базових моделей готовності.

У третьому розділі розроблено мультифрагментні марковські моделі, що математично відображають динаміку еволюції (донавчання) системи, а також удосконалено комплексний метод їх багатоступеневої перехресної верифікації та валідації.

У четвертому розділі запропоновано еталонну ІТ-архітектуру розгортання інтелектуальної системи діагностування із застосуванням цифрових двійників, представлено інструментальний засіб предиктивного моделювання (R-SIM), проаналізовано результати симуляцій у R-SIM на прикладі циркуляційного насосу малих модульних реакторів.

У висновках підведено підсумки по основних результатах дослідження та сформульовано наукові й практичні здобутки.

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 7 наукових публікаціях здобувача, серед яких: 2 статті у наукових виданнях, включених на дату опублікування до переліку наукових фахових видань України (категорія «Б»); 1 стаття у періодичному науковому виданні, проіндексованому у базах даних Web of Science Core Collection та Scopus, віднесеному до першого квартиля (Q1) відповідно до класифікації SCImago Journal and Country Rank або Journal Citation Reports. Також результати дисертації були апробовані на 3 наукових фахових конференціях.

Публікації повною мірою відображають зміст дисертаційної роботи та підтверджують отримані наукові результати. Аналіз змісту публікацій та дисертації свідчить про безумовне дотримання здобувачем принципів академічної доброчесності. Використання результатів, моделей та наборів даних інших авторів супроводжується відповідними посиланнями на джерела, запозичення оформлені коректно. У публікаціях, виконаних у співавторстві, особистий внесок здобувача є визначальним і полягає у безпосередньому розробленні марковських моделей готовності промислового обладнання, розроблення методу валідації та верифікації, формулювання архітектури інтелектуальної системи діагностування.

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

Недоліки та зауваження до дисертаційної роботи

1. У роботі недостатньо розкрито підходи до вирішення проблеми незбалансованості навчальних вибірок (data scarcity). Оскільки у надійному промисловому обладнанні критичні дефекти та відмови є вкрай рідкісними подіями, брак репрезентативних даних може суттєво ускладнювати або уповільнювати процес коректного машинного донавчання на рівні граничних обчислень.

2. Дисертація обґрунтовано фокусується на мінімізації прихованих відмов, тобто помилок другого та третього роду. Водночас, з погляду технічного обслуговування за технічним станом, поза увагою залишилося питання оцінювання ризиків хибних спрацювань системи (помилки першого роду). Надмірна чутливість нейромережевих класифікаторів, що може виникнути після ітерацій федеративного донавчання, здатна призвести до хибних тривог та економічно необґрунтованих зупинок обладнання.

3. У роботі не приділено належної уваги питанням інтерпретованості та пояснюваності прийнятих алгоритмами рішень (Explainable AI). Для систем предиктивної аналітики індустріального рівня прозорість роботи класифікатора є критично важливою вимогою для формування довіри (trustworthiness) з боку експлуатаційного персоналу підприємства.

4. Запропонована еталонна ІТ-архітектура передбачає розгортання екземплярів цифрового двійника та виконання алгоритмів донавчання безпосередньо на рівні граничних обчислень (Edge Level). Однак у дослідженні бракує кількісної оцінки впливу апаратних обмежень промислових ПОТ-контролерів на їхню здатність своєчасно обробляти ресурсоємні операції машинного навчання без порушення швидкодії процесів моніторингу в реальному часі.

Вважаю, що висловлені зауваження не є концептуальними, не зменшують загальної наукової новизни та практичної значимості результатів і не впливають на позитивну оцінку дисертаційної роботи.

Висновок про дисертаційну роботу

Вважаю, що дисертаційна робота здобувача ступеня доктора філософії Щеглова Владислава Романовича на тему «Моделі, метод та засоби інтелектуальної системи діагностування промислового обладнання з використанням індустріального інтернету речей і цифрових двійників» 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 розвитку галузі інформаційних технологій.

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 (зі змінами, внесеними згідно з Постановами Кабінету Міністрів України № 341 від 21.03.2022, № 502 від 19.05.2023, № 507 від 03.05.2024).

Здобувач Щеглов Владислав Романович заслуговує на присудження ступеня доктора філософії в галузі знань 12 Інформаційні технології за спеціальністю 123 Комп'ютерна інженерія.

Офіційний опонент,

доктор технічних наук, професор,
професор кафедри комп'ютерної інженерії
та інформаційних систем
Хмельницького національного університету

Олег САВЕНКО