

## **РЕЦЕНЗІЯ**

Брежнєва Євгена Віталійовича

на дисертаційну роботу

Щеглова Владислава Романовича

на тему «Моделі, метод та засоби інтелектуальної системи діагностування промислового обладнання з використанням індустриального 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.**

Сучасний етап розвитку цифрової інфраструктури критично важливих об'єктів (зокрема, малих модульних реакторів, високотехнологічних енергетичних та телекомунікаційних комплексів) характеризується глибоким впровадженням технологій індустриального інтернету речей (ІІІТ). Функціонування систем критичних для безпеки у режимі реального часу висуває жорсткі вимоги до їхньої надійності, безвідмовності та точності оцінювання технічного стану. У цих умовах забезпечення надвисокої експлуатаційної готовності та цілісності даних стає фундаментальним завданням, оскільки будь-які збої або невідповідності параметрів можуть призвести до відмов з важкими наслідками.

Водночас існуючі підходи до оцінювання та контролю надійності здебільшого спираються на статичні діагностичні моделі, які не здатні адекватно реагувати на процеси нелінійної деградації обладнання та динамічну зміну профілів навантаження. Виникає суперечність між необхідністю забезпечення високої готовності ІІІТ-обладнання та невідповідністю сучасних засобів діагностування. Традиційні підходи не повною мірою використовують потенціал обчислювального моделювання, предиктивного штучного інтелекту та технологій цифрових двійників. Це закономірно призводить до виникнення та накопичення прихованих (латентних) відмов, зниження достовірності моніторингу та неможливості оперативного прогнозування аварійних ситуацій.

З огляду на це, розв'язання науково-прикладної задачі щодо розроблення математичних моделей, методу та інструментальних засобів інтелектуальної системи діагностування на основі індустриального інтернету речей та цифрових двійників є актуальним та обґрунтованим. Дисертаційна робота Щеглова Владислава Романовича своєчасно відповідає на ці виклики індустрії, пропонуючи перехід до адаптивних систем діагностування з режимами донавчання, що створює наукового підґрунтя для підвищення точності оцінювання готовності, підвищення функційної безпеки та побудови надійної цифрової інфраструктури критичних об'єктів.

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

Наукові результати дисертаційної роботи є обґрунтованими, що є критичною вимогою для кіберфізичних систем, важливих для безпеки. Достовірність отриманих результатів забезпечується коректним застосуванням апарату теорії марковських випадкових процесів у неперервному часі, теорії графів та структурно-автоматних моделей. Високий рівень достовірності підтверджується розробленою автором методологією багатоступеневої перехресної верифікації моделей та глибоким аналізом проблеми

математичної «жорсткості» (stiffness) диференціальних рівнянь, що дозволяє мінімізувати похибки чисельних методів і гарантувати точність розрахунків, необхідну для об'єктів критичної інфраструктури. Крім того, адекватність отриманих висновків підтверджується розробленням та дослідженням марковських моделей готовності систем діагностування промислового ПОТ-обладнання, де використання фізично обґрунтованих експлуатаційних параметрів дозволило отримати очікувану надійнісну поведінку під час проведення комплексу експериментів з аналізу чутливості.

Наукова новизна результатів дисертаційного дослідження полягає у формуванні підходу, що підвищує гарантоздатність, а також точність оцінювання експлуатаційної готовності промислового ПОТ-обладнання, що охоплює:

- розроблення теоретико-множинної моделі та архітектури інтелектуальної системи діагностування, що дозволяє динамічно виявляти приховані відмови та гарантувати цілісність даних при оперативному і федеративному донавчанні цифрових двійників;

- удосконалення комплексу мультифрагментних марковських моделей готовності, які, спираючись на розроблений онтологічний класифікатор, формалізують динаміку зміни достовірності діагностування і створюють точний аналітичний базис для прогнозування поведінки safety-critical систем в умовах нелінійної деградації;

- розвиток методу багатоступеневої перехресної верифікації та валідації стохастичних моделей із залученням апарату структурно-автоматного моделювання та алгоритмічним розв'язанням проблеми математичної «жорсткості» матриць інтенсивностей, що є критично важливим для безпомилкового вибору інструментарію та оцінювання систем з надвисокими вимогами до надійності.

Наукові дослідження були виконані здобувачем на кафедрі кібербезпеки та інтелектуальних інформаційних технологій Національного аерокосмічного університету «Харківський авіаційний інститут» в рамках виконання державних науково-дослідних робіт на замовлення МОН України: «Методи, засоби та технології моделювання, розроблення, розгортання та забезпечення гарантоздатності мобільних інтелектуальних систем для об'єктів критичної інфраструктури» (№ Д/Р 0124U003250, 2024-теперішній час), «Наукові засади і методи забезпечення гарантоздатності флотів БПЛА інтелектуальних систем моніторингу потенційно небезпечних і військових об'єктів» (№ Д/Р 0121U112172, 2021–2023 рр.), «Методи, моделі та інформаційні технології підвищення надійності та безпечності складних ІТ-систем на етапах розроблення та впровадження» (№ Д/Р 0121U113842, 2021–2023 рр.), «Методи, програмно-апаратні засоби та технології забезпечення гарантоздатності інтелектуальних систем індустриального інтернету речей» (№ Д/Р 0122U001065, 2022–2023 рр.) під керівництвом доктора технічних наук, професора Морозової Ольги Ігорівни.

Отже, в дисертаційній роботі поставлене наукове завдання «розроблення моделей, методу та засобів оцінювання і забезпечення надійності промислового обладнання систем індустриального інтернету речей на основі інтелектуальних систем діагностування з використанням цифрових двійників та режимів донавчання» 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.Р. 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 Владислава Романовича 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 дотриманням норм академічного наукового стилю. Матеріал структуровано з достатнім рівнем логічної строгості та математичної культури.

Дослідження послідовно розгортається від огляду предметної області і концептуальної постановки задачі до теоретичної формалізації та верифікації отриманих моделей. Математичні викладки (зокрема, розв'язання проблеми «жорсткості» диференціальних рівнянь та побудова багатовимірних марковських графів) подані чітко та однозначно. Здобувач демонструє вільне та коректне володіння термінологічним апаратом у галузі комп'ютерної інженерії, функційної безпеки, теорії надійності, стохастичного моделювання та індустріального інтернету речей. Загалом стиль викладення відрізняється академічною лаконічністю, високим рівнем аргументованості та ґрунтовністю висновків.

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 наведено обґрунтування актуальності теми, чітко сформульовано науково-прикладне завдання, мету, предмет, об'єкт і методи дослідження, а також задекларовано наукову новизну та практичну цінність роботи.

Перший розділ містить ґрунтовний аналіз проблеми забезпечення готовності промислового обладнання та доводить необхідність застосування інтелектуальних систем діагностування (ІСД) з донавчанням для виявлення прихованих відмов.

У другому розділі розроблено теоретико-множинну модель архітектури ІСД та формалізовано онтологічний класифікатор, на базі якого синтезовано комплекс базових моделей готовності.

Третій розділ є фундаментальним математичним ядром роботи: у ньому розроблено та досліджено мультифрагментні марковські моделі, а також запропоновано комплексний метод їх багатоступеневої перехресної верифікації та валідації (V&V).

У четвертому розділі теоретичні результати доведено до практичної реалізації у вигляді еталонної ІТ-архітектури та інструментального засобу (R-SIM), наведено результати симуляційного моделювання (зокрема, на основі обґрунтованих і адекватних

параметрів циркуляційного насосу малих модульних реакторів), що підтверджують адекватність розроблених моделей.

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.

Результати дисертаційного дослідження були апробовані на міжнародному рівні і фаховому науковому середовищі, зокрема були представлені та обговорені на 3 наукових фахових конференціях.

Аналіз тексту дисертації та опублікованих праць беззаперечно свідчить про дотримання здобувачем принципів академічної доброчесності. Усі запозичення коректно супроводжуються посиланнями на першоджерела, ознаки плагіату чи компіляції відсутні.

У наукових працях, підготовлених у співавторстві, особистий внесок здобувача є визначальним і полягає у безпосередньому розробленні концептуальних та математичних моделей, алгоритмізації процесів, проведенні симуляційних експериментів та аналізі отриманих результатів.

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

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

Доцільно вказати на окремі недоліки та зробити такі зауваження:

1. Незважаючи на ґрунтовний опис архітектури ІСД та процесів федеративного донавчання (підрозділ 2.1), у роботі недостатньо розкрито питання гарантування кібербезпеки та цілісності телеметричних даних. Враховуючи, що об'єктом застосування є системи, критичні для безпеки (зокрема малі модульні реактори), потенційне спотворення даних при донавчанні або втрата пакетів у IoT-мережах може призвести до хибного коригування діагностичних моделей та зниження загальної функційної безпеки.

2. При розробці запропонованого методу багатоступеневої перехресної верифікації (V&V) бракує більш детального дослідження щодо масштабованості цього методу. Для великих парків обладнання експоненційне зростання розмірності матриць інтенсивностей може перетворити обчислювальну складність неявних чисельних методів на «вузьке місце», що обмежуватиме їх застосування для прийняття рішень. Бракує прикладів для зазначеної у методі стратегії уникнення жорсткості (SAA).

3. При моделюванні ескалації прихованих відмов до аварійних станів у мультифрагментних марковських моделях (розділ 3) автор здебільшого розглядає ізольовану поведінку об'єкта. Для складних кіберфізичних об'єктів критичної інфраструктури доцільно було б розширити моделі з урахуванням ймовірності виникнення каскадних відмов, коли неідентифікована латентна помилка одного компонента спричиняє ланцюгову реакцію збоїв у суміжних підсистемах автоматики.

4. Виконаний аналіз чутливості (sensitivity analysis) розроблених моделей демонструє ефективність стратегій донавчання за різних умов. Разом з тим, для підвищення практичної довіри до кількісних результатів, автору варто було б детальніше обґрунтувати джерела отримання або методики збору еталонних інтенсивностей відмов і донавчання (параметрів  $\lambda$  та  $\mu$ ), які використовувались як базова конфігурація при симуляційному моделюванні. А саме це стосується МФММ1 та МФММ2.

5. Безпосередньо у розроблених марковських моделях (у вигляді окремих станів) процеси мережевої синхронізації та мікрозатримки не враховуються. Це обмеження опосередковано через контроль та закладено у припущеннях до моделей: згідно з підрозділом 3.2.1, «вплив засобів контролю на систему вважається ідеалізованим...». Але не завжди є коректним на практиці: засоби контролю можуть мати збої в роботі, канали передачі знаходяться під впливом перешкод в промисловому середовищі, порушується калібрування сенсорів, існують обмеження щодо пропускної здатності каналів передачі, т.і. Все це призводить до розсинхронізації двійника та об'єкта, підвищує ризики втрати параметрів телеметрії та впливає на точність моделі.

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 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.

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

Рецензент:

Доктор технічних наук, професор,  
професор кафедри кібербезпеки та  
інтелектуальних інформаційних технологій  
Національного аерокосмічного університету  
«Харківський авіаційний інститут»

Євген БРЕЖНЄВ