

Голові разової спеціалізованої  
вченої ради PhD 12564  
Хмельницького національного  
університету  
доктору технічних наук,  
професору Сергію ЛИСЕНКО

## РЕЦЕНЗІЯ

на дисертаційне дослідження Козельського Олександра Володимировича  
за темою «Методи та засоби планування задач і підвищення ефективності  
операційних систем реального часу», подане на здобуття ступеня доктора  
філософії

з галузі знань 12 Інформаційні технології  
за спеціальністю 123 Комп'ютерна інженерія

*Актуальність теми дослідження та її зв'язок із планами наукових робіт університету.*

Інтенсивний розвиток кіберфізичних систем, Інтернету речей, автономних технічних комплексів та інтелектуальних вбудованих пристроїв зумовив істотне зростання ролі операційних систем реального часу у забезпеченні функціонування сучасних інформаційно-керуючих систем. ОСРЧ забезпечують своєчасне виконання критичних задач, координацію взаємодії між обчислювальними модулями, сенсорами та виконавчими пристроями, а також підтримання працездатності системи в умовах динамічної зміни навантаження. Зростання складності кіберфізичних систем, підвищення вимог до надійності та безперервності функціонування, а також необхідність оброблення значних обсягів телеметричних даних вимагають удосконалення архітектур і методів побудови ОСРЧ.

Особливої актуальності ця проблема набуває в умовах інтенсивних змін станів, нестаціонарних навантажень, деградаційних процесів, можливих фальсифікацій сенсорних даних і зловмисних впливів. Традиційні підходи до побудови ОСРЧ здебільшого орієнтовані на статичні критерії планування та реактивне усунення наслідків відмов, що обмежує адаптивність системи, ускладнює своєчасне виявлення критичних режимів роботи та не дозволяє повною мірою враховувати багатовимірну динаміку навантаження.

Саме розв'язанню цієї науково-прикладної проблеми присвячено дисертаційне дослідження Козельського О. В., у якому запропоновано удосконалену архітектуру ОСРЧ із залученням зовнішнього аналітичного модуля, метод динамічного розподілу задач і ресурсів на основі тензорної декомпозиції, метод превентивного відновлення компонентів на основі низькорозмірної марковської моделі та метод виявлення фальсифікацій і

аномалій у сигналах кіберфізичних систем на основі модифікованого комбінованого фільтра Калмана.

Дисертаційне дослідження виконано в межах науково-дослідної тематики Хмельницького національного університету, зокрема в рамках держбюджетних науково-дослідних тем № 2Б-2024 «Система виявлення ЗПЗ та комп'ютерних атак в корпоративних мережах з використанням хибних об'єктів атак та пасток» (номер державної реєстрації 0124U000980) та № 1Б-2026 «Система забезпечення стійкості до витоку конфіденційної інформації в корпоративних мережах в умовах впливів комп'ютерних атак» (номер державної реєстрації 0126U002082), у виконанні яких автор дисертації брав участь як виконавець.

Загалом, обраний дисертантом напрям дослідження є актуальним і має науково-прикладне значення.

#### *Формулювання наукової задачі, мети й задачі дослідження.*

Здобувачем коректно визначено об'єкт і предмет дослідження відповідно до мети та логіки дисертаційної роботи. Так, об'єктом дослідження є процеси функціонування операційних систем реального часу в кіберфізичних системах в умовах інтенсивних змін станів. Предметом дослідження є методи та засоби адаптивного планування задач і розподілу ресурсів на основі багатовимірного аналізу навантаження, превентивного відновлення компонентів із прогнозуванням станів, а також виявлення аномалій і фальсифікацій сенсорних даних в ОСРЧ для кіберфізичних систем.

Мету дисертаційної роботи визначено як підвищення ефективності використання ресурсів, безперервності та надійності роботи операційних систем реального часу в кіберфізичних системах з інтенсивними змінами станів шляхом розроблення методів адаптивного планування, динамічного розподілу ресурсів, превентивного відновлення, виявлення аномалій та фальсифікацій.

Поставлена мета досягнута в результаті розв'язання таких завдань:

1) проведено аналіз існуючих архітектур операційних систем реального часу для кіберфізичних систем з інтенсивними змінами станів та визначено їхні обмеження щодо адаптивності, відмовостійкості й інтеграції інтелектуальних методів обробки даних;

2) удосконалено архітектуру планувальника задач ОСРЧ шляхом залучення зовнішнього модуля машинного навчання та зворотного каналу самоадаптації, що забезпечує збирання багатовимірної телеметрії, її тензорне подання та адаптивне оновлення параметрів планування без втручання користувача;

3) розроблено метод динамічного розподілу задач і ресурсів в ОСРЧ на основі тензорної декомпозиції, який враховує взаємозв'язки між параметрами задач і ресурсів та забезпечує підвищення ефективності використання обчислювальних ресурсів;

4) розроблено метод превентивного відновлення компонентів ОСРЧ на основі низькорозмірної марковської моделі прогнозування станів у поєднанні з

багаторівневим сторожовим контролем, що дозволяє завчасно виявляти деградаційні процеси та ініціювати локальні відновлювальні дії;

5) розроблено метод виявлення фальсифікацій та аномалій у комп'ютерних системах для сигналів кіберфізичних систем на основі модифікованого комбінованого фільтра Калмана з подієвим перемиканням режимів і селективним пригніченням підозрілих вимірів, придатний для реалізації в умовах обмежених ресурсів мікроконтролерів;

б) проведено експериментальну перевірку розроблених методів і архітектурних рішень на вбудованій платформі під керуванням ОСРЧ та оцінено їх ефективність за показниками використання процесора й пам'яті, часу виконання задач, тривалості простою системи, швидкодії відновлення та точності виявлення аномалій.

*Наукова новизна отриманих автором результатів полягає в наступному:*

1) розроблено удосконалену архітектуру планувальника задач із залученням зовнішнього модуля машинного навчання, яка, на відміну від традиційних архітектур ОСРЧ, передбачає винесення аналітичних обчислень за межі мікроконтролера та формування зворотного каналу самоадаптації, що забезпечує збирання багатовимірної телеметрії, її перетворення у тензорні подання та адаптивне оновлення параметрів планувальника без втручання користувача;

2) вперше розроблено метод динамічного розподілу задач і ресурсів в ОСРЧ на основі тензорної декомпозиції, який, на відміну від існуючих підходів, використовує багатовимірні моделі системного навантаження для прогнозування поведінки задач з урахуванням взаємозв'язків між параметрами та формування рішень на основі їх комплексного аналізу, що дає змогу зменшити навантаження на процесор, скоротити час виконання задач і підвищити ефективність використання ресурсів системи;

3) вперше розроблено метод превентивного відновлення компонентів ОСРЧ, який поєднує низькорозмірну марковську модель прогнозування станів із багаторівневим сторожовим контролем і, на відміну від традиційних watchdog-схем, дозволяє завчасно оцінювати ризик відмови та ініціювати локальні відновлювальні дії без повного перезапуску системи, зберігаючи низьку обчислювальну складність, придатну для мікроконтролерів;

4) набув подальшого розвитку метод виявлення фальсифікацій та аномалій у комп'ютерних системах для сигналів кіберфізичних систем на основі модифікованого комбінованого фільтра Калмана з подієвим перемиканням режимів, який, на відміну від відомих багатомодельних та адаптивних фільтрів, не потребує одночасного запуску набору моделей, забезпечує селективне пригнічення підозрілих вимірів на основі аналізу інновацій, що дозволяє розрізняти нормальні режимні зміни та зловмисні відхилення, зменшувати кількість хибних спрацювань і забезпечувати придатність методу до застосування в ресурсообмежених КФС.

### *Короткий аналіз основного змісту дисертації.*

У вступі дисертаційної роботи обґрунтовано актуальність обраної теми, сформульовано мету та основні завдання дослідження, визначено об'єкт і предмет дослідження, а також висвітлено наукову новизну та практичне значення одержаних результатів.

У першому розділі проаналізовано предметну область дослідження, а саме особливості функціонування операційних систем реального часу в кіберфізичних системах з інтенсивними змінами станів, підходи до планування задач, забезпечення відмовостійкості, прогнозування збоїв, а також методи виявлення аномалій і фальсифікацій. Проведений аналіз дозволив виявити переваги та обмеження відомих підходів і здійснити постановку задачі дослідження.

У другому розділі представлено архітектуру планувальника задач ОСРЧ із залученням зовнішнього аналітичного модуля та розроблено метод динамічного розподілу задач і ресурсів на основі тензорної декомпозиції. Показано, що винесення аналітичної обробки за межі критичного контуру реального часу дає можливість здійснювати адаптивне керування ресурсами без порушення детермінованості виконання задач, а використання тензорного подання телеметрії дозволяє враховувати багатовимірну динаміку системного навантаження.

У третьому розділі представлено метод превентивного відновлення компонентів ОСРЧ на основі марковської моделі прогнозування станів та метод виявлення фальсифікацій і аномалій у сигналах кіберфізичних систем на основі модифікованого комбінованого фільтра Калмана. Подано формалізацію методів, описано алгоритми їх реалізації та принципи реагування системи у разі виявлення деградаційних процесів, аномалій або атак.

У четвертому розділі представлено експериментальну перевірку запропонованих архітектурних і алгоритмічних рішень на базі прототипу ОСРЧ, реалізованого на платформі STM32F407G-DISC1 під керуванням FreeRTOS. Наведено опис експериментального стенда, реалізацію методів у складі прототипу системи та результати експериментів, за якими підтверджено підвищення ефективності використання ресурсів, зменшення часу простою та підвищення стійкості системи до збоїв і зловмисних впливів.

*Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій.* Наукові положення, висновки та рекомендації, подані в дисертації, обґрунтовані коректним і доцільним використанням математичного апарату тензорного аналізу, лінійної алгебри, марковських процесів, теорії ймовірностей, методів оцінювання та фільтрації сигналів, а також засобів моделювання й експериментальної перевірки в операційних системах реального часу. Достовірність одержаних результатів підтверджується успішною програмно-апаратною реалізацією запропонованих методів у складі прототипу ОСРЧ на базі FreeRTOS і мікроконтролерної платформи STM32F407G-DISC1, а також практичним впровадженням результатів дисертаційного дослідження в

організаціях та освітньому процесі, що засвідчило узгодженість теоретичних положень із результатами їх практичного застосування.

*Практичне значення одержаних результатів.* Результатом дисертаційної роботи є удосконалена архітектура планувальника задач операційної системи реального часу із залученням зовнішнього аналітичного модуля, а також розроблені методи динамічного розподілу задач і ресурсів на основі тензорної декомпозиції, превентивного відновлення компонентів ОСРЧ на основі низькорозмірної марковської моделі та виявлення фальсифікацій і аномалій у сигналах кіберфізичних систем на основі модифікованого комбінованого фільтра Калмана. Це дало змогу створювати ОСРЧ з покращеними характеристиками використання обчислювальних ресурсів, підвищеною відмовостійкістю та стійкістю до зловмисних впливів в умовах інтенсивних змін станів.

Також у роботі реалізовано підхід до адаптивного керування розподілом задач і ресурсів без збільшення навантаження на мікроконтролер і без порушення детермінованості виконання задач реального часу. Як показали експериментальні дослідження, застосування методу динамічного розподілу задач і ресурсів на основі тензорної декомпозиції забезпечило інтегральний показник ефективності на рівні 5,19 %, а застосування методу превентивного відновлення дозволило зменшити частку простою системи з 4,5 % до 1,37 % та прискорити відновлення у 3,29 рази порівняно з традиційним апаратним сторожовим таймером.

Крім того, експериментальні дослідження підтвердили ефективність методу виявлення фальсифікацій та аномалій у сигналах кіберфізичних систем на основі модифікованого комбінованого фільтра Калмана, який забезпечив найвищий інтегральний показник ефективності серед порівнюваних методів. Це дає змогу створювати ОСРЧ з покращеними характеристиками продуктивності, безперервності функціонування, надійності та кіберстійкості для вбудованих і кіберфізичних систем.

*Особистий внесок здобувача* полягає в розробленні архітектури та методів планування задач, динамічного розподілу ресурсів, превентивного відновлення компонентів і виявлення аномалій в операційних системах реального часу для кіберфізичних систем з інтенсивними змінами станів. Усі основні наукові та прикладні результати дисертаційної роботи отримані здобувачем самостійно. За результатами проведених досліджень основні наукові результати опубліковано у публікаціях 3 праць в матеріалах міжнародних конференцій, всі з них проіндексовані у наукометричній базі Scopus. Опубліковано 1 свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір (програму).

*Апробація матеріалів дисертації.*

Основні положення, ідеї та висновки дисертаційної роботи пройшли апробацію на науковому семінарі кафедри комп'ютерної інженерії та інформаційних систем Хмельницького національного університету. Результати

дослідження також доповідалися на міжнародних і всеукраїнських науково-практичних конференціях: 1st International Workshop on Advanced Applied Information Technologies (AdvAIT-2024), Khmelnytskyi, Ukraine – Zilina, Slovakia, December 5, 2024; 2nd International Workshop on Intelligent & CyberPhysical Systems (ICyberPfyS-2025), Khmelnytskyi, Ukraine, July 4, 2025; The International Workshop on Applied Intelligent Security Systems in Law Enforcement (AISSLE-2025), Vinnytsia, Ukraine, October 30- November 02, 2025.

#### *Структура та обсяг дисертації.*

Дисертація складається з анотації, змісту, переліку умовних скорочень, вступу, чотирьох розділів, висновку, списку використаних джерел та восьми додатків. Повний обсяг роботи містить 285 сторінок друкованого тексту, з них анотація – на 15 стор., зміст – на 3 стор., перелік умовних скорочень – на 1 стор., основний текст – на 144 стор., список із 153 використаних джерел – на 21 стор., додатки – на 89 стор. Дисертаційна робота в собі містить 28 рисунків та 10 таблиць.

#### *Зауваження.*

За результатами розгляду дисертаційної роботи можна сформулювати такі зауваження та рекомендації.

У другому розділі показано, що в разі втрати зв'язку із зовнішнім аналітичним модулем ОСРЧ продовжує роботу, використовуючи останні валідні параметри планування або базові статичні налаштування. Разом із тим, для підвищення завершеності архітектурного опису доцільно було б більш чітко визначити критерії актуальності цих параметрів та умови переходу від режиму використання попередньо сформованих налаштувань до повністю базового режиму планування.

Експериментальну перевірку запропонованих методів виконано на відладочній платформі STM32F407G-DISC1 під керуванням FreeRTOS, що є достатнім для підтвердження працездатності прототипу. Разом із тим, для посилення прикладної цінності результатів доцільно було б більш чітко окреслити можливості перенесення запропонованих рішень на інші мікроконтролерні платформи або класи вбудованих систем, зокрема з відмінними обсягами пам'яті, продуктивністю та складом периферії.

У роботі трапляються окремі неузгодженості між різними частинами довідково-бібліографічного апарату. Зокрема, у переліку апробацій матеріалів дисертації публікація за матеріалами AISSLE-2025 подана без позначення (Scopus), тоді як у списку використаних джерел це саме видання вже наведено з відповідною позначкою. Такі неузгодженості доцільно було б уніфікувати під час остаточного редагування роботи.

У вступі та першому розділі поняття «інтенсивні зміни станів» визначено через досягнення граничних значень ключових параметрів функціонування системи. Водночас для посилення формальної строгості викладу доцільно було б подати це поняття у вигляді більш уніфікованої системи кількісних критеріїв або індикаторів, що дозволило б ще чіткіше окреслити межі застосовності запропонованих методів.

Дисертація достатньо проілюстрована. Деякі рисунки, наприклад рис. 1.1 (стор. роботі, але разом з тим їх недоліком є велика кількість деталізацій, які зменшують їх читабельність та сприйняття.

Втім, зазначені зауваження суттєво не впливають на загальний, доволі високий рівень проведеного дослідження.


*Загальний висновок.*

Вважаю, що дисертаційна робота Козельського Олександра Володимировича на тему «Методи та засоби планування задач і підвищення ефективності операційних систем реального часу» містить нові науково обґрунтовані теоретичні та експериментальні результати в галузі 12 Інформаційні технології, сукупність яких забезпечила розв'язання актуального науково-прикладного завдання підвищення ефективності, відмовостійкості та захищеності операційних систем реального часу для кіберфізичних систем з інтенсивними змінами станів.

Дисертаційна робота «Методи та засоби планування задач і підвищення ефективності операційних систем реального часу», яка подана на здобуття ступеня доктора філософії, за своїм науковим рівнем та практичною цінністю, змістом та оформленням повністю відповідає вимогам пп. 6, 7, 8, 9 «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженому 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), а її автор, Козельський Олександр Володимирович, заслуговує на присудження ступеня доктора філософії за спеціальністю 123 Комп'ютерна інженерія.

Рецензент:

кандидат технічних наук, доцент

Хмельницького національного університету  Марія КАПУСТЯН

«Підпис Марії КАПУСТЯН засвідчую»:

Проректор з наукової роботи

Хмельницького національного університету 

Олег СИНЮК

