

Голові разової спеціалізованої
вченої ради PhD 12564
Хмельницького національного університету
доктору технічних наук, професору
Сергію ЛИСЕНКО
29016, м. Хмельницький,
вул. Інститутська, 11

ВІДГУК ОФІЦІЙНОГО ОПОНЕНТА

кандидата технічних наук, доцента **Волокити Артема Миколайовича**
на дисертаційну роботу **Козельського Олександра Володимировича**
на тему: «Методи та засоби планування задач і підвищення ефективності
операційних систем реального часу», подану до захисту на здобуття наукового
ступеня **доктора філософії** з галузі знань 12 Інформаційні технології
за спеціальністю 123 Комп'ютерна інженерія

1. Актуальність теми дисертаційної роботи

Сучасні кіберфізичні системи та вбудовані пристрої активно використовуються у промисловості, транспорті, енергетиці та інших критично важливих сферах, де обробка, передача та аналіз даних здійснюються в режимі реального часу. У таких умовах операційні системи реального часу забезпечують виконання керуючих функцій, координацію задач і обробку телеметрії, що висуває підвищені вимоги до їх ефективності, надійності та стійкості до збурень і зловмисних впливів. При цьому складність систем постійно зростає, збільшується обсяг даних і динаміка змін станів, що ускладнює забезпечення стабільного функціонування за обмежених обчислювальних ресурсів.

Водночас традиційні підходи до планування задач в операційних системах реального часу переважно базуються на статичних або локальних характеристиках, таких як пріоритети, дедлайни чи періоди виконання, що не дозволяє повною мірою враховувати багатовимірну природу навантаження та взаємозв'язки між задачами і ресурсами. Це призводить до зниження ефективності використання ресурсів, збільшення часу реакції системи та підвищення ризику переходу в критичні стани, особливо в умовах інтенсивних змін та можливих атак на сенсорні дані. Незважаючи на значну кількість наукових досліджень у сфері операційних систем реального часу, задачі адаптивного планування, динамічного розподілу ресурсів, превентивного відновлення та виявлення аномалій у кіберфізичних системах залишаються недостатньо вирішеними, що обумовлює актуальність даного дослідження.

2. Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Дисертаційне дослідження виконувалось у рамках науково-дослідних тематик Хмельницького національного університету: держбюджетної науково-дослідних теми № 2Б-2024 «Система виявлення ЗПЗ та комп'ютерних атак в корпоративних мережах з використанням хибних об'єктів атак та пасток» (номер державної реєстрації: 0124U000980), № 1Б-2026 «Система забезпечення стійкості до витоку конфіденційної інформації в корпоративних мережах в умовах впливів комп'ютерних атак» (номер державної реєстрації: 0126U002082), в яких автор дисертації був виконавцем.

3. Наукова новизна отриманих результатів.

Даючи оцінку головним здобуткам дисертаційної роботи, слід зробити акцент на таких основних наукових результатах:

- удосконалено механізм планувальника задач ОСРЧ, який за рахунок зовнішнього модуля машинного навчання, виконує аналітичні обчислення за межами мікроконтролера, що дозволяє адаптивно оновлювати параметри планувальника без втручання користувача, зберігаючи детермінованість виконання задач реального часу та усуваючи обмеження, пов'язані з ресурсною обмеженістю мікроконтролерних платформ.

- розроблено метод динамічного розподілу задач в ОСРЧ на основі тензорної декомпозиції, який, на відміну від існуючих методів, використовує багатовимірний тензор системного навантаження для виявлення прихованих взаємозв'язків між навантаженням на процесор, часом виконання задач і використанням пам'яті, що дозволяє формувати більш ефективні стратегії планування задач і розподілу ресурсів.

- розроблено метод превентивного відновлення виконання задач в ОСРЧ, який, на відміну від традиційних сторожових таймерів, поєднує низькорозмірну марковську модель прогнозування станів задач із багаторівневим сторожовим механізмом для завчасного виявлення критичних ситуацій, що дозволяє ініціювати локальне програмне відновлення до настання відмови, скорочуючи час простою та забезпечуючи високу надійність функціонування при низькій обчислювальній складності.

- удосконалено метод виявлення аномалій та фальсифікацій у сигналах кіберфізичних систем на основі модифікованого комбінованого фільтра Калмана, який, на відміну від відомих підходів, реалізує перемикання режимів оцінювання на основі правил та селективне пригнічення підозрілих вимірів на основі аналізу інновацій, що дозволяє відокремити коректні режими від зловмисних впливів, зменшити кількість хибних спрацювань в ресурсообмежених системах реального часу.

В дисертаційній роботі повністю виконано поставлене завдання щодо розробки методів і засобів підвищення ефективності, надійності та стійкості операційних систем реального часу для кіберфізичних систем з інтенсивними змінами станів. Результати дисертаційного дослідження свідчать про те, що здобувач повною мірою оволодів методологією наукової діяльності та сучасними підходами до синтезу адаптивних і відмовостійких систем реального часу.

4. Короткий аналіз основного змісту дисертації

Науковий рівень викладення матеріалу в дисертації відповідає встановленим вимогам МОН України. Назва роботи коректно та повною мірою відображає її зміст.

У *вступі* обґрунтовано актуальність теми дисертації, визначено мету, об'єкт та предмет дослідження, сформульовано основні завдання, відображено наукову новизну і окреслено практичне значення роботи, підтверджено впровадження результатів, а також наведено інформацію про особистий внесок здобувача, апробацію та публікації.

У *першому розділі* здійснено аналіз предметної області дослідження, зокрема сучасних ОСРЧ та їх застосування в кіберфізичних системах. Розглянуто існуючі обмеження у забезпеченні ефективності, відмовостійкості та захищеності в умовах інтенсивних змін станів. Також проведено аналіз методів моніторингу, самовідновлення та захисту, що використовуються в сучасних системах.

Здійснено критичний огляд наукової літератури та існуючих рішень. На основі проведеного аналізу сформульовано науково-технічну задачу дослідження та визначено комплекс завдань, спрямованих на підвищення ефективності та стійкості ОСРЧ.

У *другому розділі* представлено концепцію удосконаленого механізму ОСРЧ з інтеграцією зовнішнього модуля, який здійснює обробку телеметричних

даних та формує керуючі впливи для адаптації системи. Розроблено метод динамічного розподілу задач і ресурсів на основі тензорної декомпозиції, що дозволяє враховувати багатовимірні характеристики навантаження при формуванні більш ефективніших стратегій планування задач. Наведено структурну модель взаємодії компонентів системи, включаючи підсистеми моніторингу, аналізу та планування, а також обґрунтовано можливість реалізації аналітичного модуля як зовні, так і безпосередньо в мікроконтролері без порушення детермінованості ОСРЧ.

У *третьому розділі* описано розробку методів прогнозування збоїв, превентивного відновлення та виявлення аномалій і фальсифікацій у сигналах кіберфізичних систем. Запропоновано метод превентивного відновлення на основі низькорозмірної марковської моделі, який забезпечує оцінювання ймовірностей переходів між станами задач ОСРЧ та реалізацію їх локального відновлення без глобального перезапуску. Також розроблено метод виявлення аномалій на основі модифікованого комбінованого фільтра Калмана з подієвим перемиканням режимів оцінювання на основі правил із селективним пригніченням підозрілих вимірів за результатами аналізу інновацій. Наведено формалізацію методів і алгоритми їх реалізації, а також виконано оцінку їх ефективності.

У *четвертому розділі* представлено методику експериментальної перевірки запропонованих методів у складі ОСРЧ для кіберфізичних систем. Описано створене експериментальне середовище на базі мікроконтролера з використанням FreeRTOS, а також реалізовані механізми адаптивного планування, превентивного відновлення та виявлення аномалій. Наведено результати експериментів і виконано розрахунок показників ефективності, продуктивності та стійкості системи, що підтверджують переваги запропонованих рішень порівняно з традиційними підходами.

У висновках сформульовано основні наукові та практичні результати дисертаційного дослідження, що підтверджують досягнення поставленої мети та розв'язання визначених завдань. Надано рекомендації щодо застосування розроблених методів у вбудованих та розподілених кіберфізичних системах для підвищення ефективності, надійності та стійкості їх функціонування.

5. Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, їх достовірність

Подані в дисертації наукові положення, висновки та рекомендації є належно обґрунтованими, логічно узгодженими між собою та підтверджуються результатами експериментів і практичним впровадженням запропонованих рішень.

Наукова обґрунтованість отриманих результатів забезпечується опрацюванням наукових джерел, чітким визначенням мети й завдань дослідження, а також застосуванням сучасного апарату теорії керування, математичного моделювання, тензорного аналізу, теорії марковських процесів і методів фільтрації сигналів.

Достовірність отриманих результатів дисертаційного дослідження підтверджується їх обговоренням на науково-практичних конференціях різного рівня, а також перевіркою під час практичної реалізації запропонованих рішень на експериментальному прототипі ОСРЧ.

6. Практичні результати роботи

Практичне значення отриманих результатів роботи полягає у тому, що за результатами проведених здобувачем досліджень розроблено архітектуру ОСРЧ для кіберфізичних систем з інтенсивними змінами станів, метод динамічного

розподілу задач і ресурсів на основі тензорної декомпозиції, метод превентивного відновлення компонентів на базі низькорозмірної марковської моделі та метод виявлення аномалій і фальсифікацій у сигналах на основі модифікованого комбінованого фільтра Калмана. Це дало змогу створювати самоадаптивні операційні системи реального часу з покращеними показниками ефективності використання ресурсів, безперервності функціонування та стійкості до збоїв і зловмисних впливів у вбудованих і розподілених кіберфізичних системах.

Застосування методу динамічного розподілу задач і ресурсів на основі тензорної декомпозиції забезпечило інтегральне підвищення ефективності функціонування системи на 5,19 %. Використання методу превентивного відновлення компонентів ОСРЧ на основі марковської моделі та дворівневого сторожового контролю дозволило зменшити простій системи з 4,5 % до 1,37 % та прискорити відновлення після збоїв у 3,29 рази. Результати експериментальних досліджень також підтвердили, що застосування модифікованого комбінованого фільтра Калмана забезпечує найвищу інтегральну ефективність, яка становить 9,17 та перевищує ефективність адаптивного фільтра Калмана на 21,94 %.

Основні теоретичні результати та практичні розробки, отримані в межах дослідження, знайшли застосування у роботі ТОВ «Ультра ІТ», ТОВ «ДЕВІКС ДІДЖИТАЛ», ТОВ «Nolt technologies» (м. Хмельницький), а також впроваджені в освітній процес Хмельницького національного університету на кафедрі комп'ютерної інженерії та інформаційних систем при викладанні курсів «Технічна діагностика і надійність комп'ютерних пристроїв» і «Безпека та захист комп'ютерних систем», а також, в освітньому процесі у блоці військово-спеціальних дисциплін та використані при удосконаленні навчально-лабораторного комплексу другої кафедри Другого навчально-наукового інституту Військової академії імені Євгена Березняка.

7. Оформлення дисертації, дотримання вимог академічної доброчесності та повнота викладу наукових положень та результатів в опублікованих працях.

Дисертаційна робота має логічну структуру і складається з анотації, змісту, переліку умовних скорочень, вступу, чотирьох розділів, висновку, списку використаних джерел та шести 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. Дисертація містить 28 рисунків та 10 таблиць.

Дисертаційну роботу оформлено з дотриманням вимог наказу МОН України від 12 січня 2017 року № 40 з урахуванням змін, затверджених наказом Міністерства освіти і науки України № 759 від 31.05.2019.

У дисертаційній роботі не встановлено неправомірних текстових запозичень чи використання наукових результатів інших авторів без належного посилання на відповідні джерела.

Основні результати дослідження відображено у 6 статтях, опублікованих у фахових наукових виданнях України, а також підтверджено одним свідоцтвом про реєстрацію авторського права на програмний твір. Крім того, результати роботи пройшли апробацію на 3 наукових фахових конференціях із публікацією доповідей у збірниках матеріалів, з яких всі праці індексуються в наукометричній базі Scopus.

Усі наукові положення та результати дисертаційного дослідження достатньо повно висвітлені в публікаціях здобувача, у яких відображено концептуальні засади роботи, її ключові наукові результати та практичне значення. У наукових працях, виконаних у співавторстві, особистий внесок здобувача є суттєвим і полягає у формуванні наукових ідей, розробленні математичних моделей та алгоритмічного забезпечення, проведенні

експериментальних досліджень, а також опрацюванні й аналізі отриманих результатів.

Отже, основні наукові результати, отримані в дисертаційній роботі, повною мірою відображені у публікаціях здобувача.

8. Мова та стиль дисертаційної роботи

Матеріал дисертаційної роботи подано послідовно й логічно. Робота містить достатню кількість ілюстративних матеріалів, зокрема схем, рисунків, графіків і таблиць. Мова, стиль викладу та оформлення дисертації відповідають вимогам, установленим для наукових праць.

9. Зауваження та дискусійні положення щодо змісту дисертації

Зауваження та рекомендації до дисертації:

1. У першому розділі дисертаційної роботи ґрунтовно висвітлено особливості функціонування ОСРЧ у кіберфізичних системах, а також проаналізовано підходи до забезпечення відмовостійкості, прогнозування збоїв і виявлення аномалій, що підтверджується самою структурою підрозділів 1.1–1.4. Водночас для посилення логіки переходу від аналітичного огляду до постановки задачі дослідження доцільно було б більш чітко систематизувати в кінці розділу виявлені обмеження існуючих підходів окремо за напрямками адаптивного планування, превентивного відновлення та виявлення аномалій.

2. У другому розділі наведено метод динамічного розподілу задач і ресурсів в ОСРЧ на основі тензорної декомпозиції. Викладено послідовно і аргументовано, проте для повноти сприйняття доцільно було б окремо узагальнити залежність між розмірністю тензорного подання, глибиною аналізу та обчислювальними витратами при переході до складніших конфігурацій

взаємозв'язку між параметрами задач і компонентами ОСРЧ, тобто перехід до тензорів більшої розмірності.

3. У параграфі 3.2, присвяченому методу превентивного відновлення компонентів ОСРЧ на основі низькорозмірної марковської моделі, доцільно було б більш детально пояснити принцип вибору контрольованих системних метрик і порогових значень, а також їх зв'язок з інтенсивністю зміни станів системи.

4. У роботі показано ефективність запропонованих методів на прототипі ОСРЧ, реалізованому на базі STM32F407 під керуванням FreeRTOS. Разом із тим, для посилення прикладної цінності результатів доцільно було б більш детально окреслити умови адаптації запропонованих методів до інших конфігурацій кіберфізичних систем, що можуть відрізнятися кількістю задач, інтенсивністю телеметричного потоку та обмеженнями обчислювальних ресурсів.

5. У параграфі 3.3, присвяченому методу виявлення фальсифікацій та аномалій у сигналах кіберфізичних систем на основі модифікованого комбінованого фільтра Калмана, доцільно було б більш детально розглянути обмеження застосування методу на основі фільтра Калмана, зокрема щодо чутливості до параметрів налаштування та умов функціонування ОСРЧ, що дозволило б повніше оцінити межі ефективного використання методу.

Зазначені зауваження істотно не впливають на зміст дисертаційної роботи та не знижують її наукову новизну та практичну цінність.

Висновки щодо дисертації в цілому

Узагальнюючи викладене, вважаю, що дисертація Козельського Олександра Володимировича на тему «Методи та засоби планування задач і підвищення ефективності операційних систем реального часу», подана на здобуття ступеня доктора філософії, за своїм науковим рівнем, практичною

цінністю, змістом та оформленням повністю відповідає вимогам пунктів 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», 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, а її автор, Козельський Олександр Володимирович, заслуговує на присудження наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 123 Комп'ютерна інженерія.

Офіційний опонент:

В.о. зав. кафедри обчислювальної техніки
Національного технічного університету України
«Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського»,
кандидат технічних наук, доцент

04.05.2026

