

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

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

Розвиток кіберфізичних систем, Інтернету речей, автономних технічних комплексів та інтелектуальних вбудованих пристроїв зумовлює зростання вимог до ефективності, надійності, безперервності функціонування та захищеності їх програмно-апаратної основи. Такі системи використовуються у промисловості, транспорті, енергетиці, робототехніці та інших галузях, де необхідним є своєчасне оброблення телеметричних даних, керування фізичними процесами в реальному часі та підтримання стійкої роботи в умовах динамічної зміни станів. За цих умов операційні системи реального часу відіграють ключову роль у забезпеченні функціонування кіберфізичних систем. Саме ОСРЧ реалізують механізми планування задач, керування процесорним часом, пам'яттю та іншими ресурсами, координації взаємодії між сенсорами, виконавчими пристроями й обчислювальними компонентами. Від архітектури та принципів функціонування ОСРЧ безпосередньо залежать своєчасність реакції системи, коректність оброблення сигналів, стійкість до збоїв та загальна ефективність функціонування кіберфізичного комплексу. Водночас функціонування ОСРЧ у складі кіберфізичних систем відбувається в умовах інтенсивних змін станів, нестаціонарних навантажень, деградаційних

процесів, можливих фальсифікацій сенсорних даних і зловмисних впливів. Традиційні підходи до побудови ОСРЧ переважно орієнтовані на статичні критерії планування та реактивне усунення наслідків відмов, що обмежує їх адаптивність, ускладнює своєчасне виявлення критичних режимів роботи та знижує ефективність використання ресурсів. У зв'язку з цим наукова робота Козельського О. В. є актуальною і присвячена розробленню методів та засобів планування задач і підвищення ефективності операційних систем реального часу, зокрема шляхом адаптивного розподілу ресурсів, превентивного відновлення компонентів і виявлення аномалій та фальсифікацій у сигналах кіберфізичних систем.

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.

Тому впевнено можна сказати, що розв'язання науково-практичної задачі підвищення ефективності використання ресурсів, безперервності функціонування, відмовостійкості та захищеності ОСРЧ у кіберфізичних системах з інтенсивними змінами станів є актуальним і своєчасним у сучасних умовах.

Формулювання наукової задачі та мети й задач дослідження

Здобувач коректно визначив об'єкт і предмет дослідження. 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 багатовимірної 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.

Поставлену мету досягнуто в результаті розв'язання таких задач:

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

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

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;

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;

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;

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, кількості хибних спрацювань, швидкодії відновлення та обчислювальної складності.

3. Наукова новизна одержаних 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 і дає змогу враховувати багатовимірну динаміку навантаження під час керування ресурсами, усуваючи обмеження, зумовлені обчислювальними ресурсами мікроконтролерних платформ, при цьому зберігаючи детермінованість виконання задач у критичному контурі реального часу;

2) вперше розроблено метод динамічного розподілу задач і ресурсів в ОСРЧ на основі тензорної декомпозиції, який використовує багатовимірні моделі системного навантаження для прогнозування поведінки задач з урахуванням взаємозв'язків між параметрами з наступним формуванням рішення на основі їх комплексного аналізу, що на відміну від існуючих алгоритмів розподілу ресурсів, які базуються переважно на одномірних метриках або локальних характеристиках задач, дає змогу скоротити час виконання, зменшити навантаження на процесор та підвищити ефективність використання ресурсів системи;

3) вперше розроблено метод превентивного відновлення компонентів ОСРЧ, який поєднує низькорозмірну марковську модель прогнозування станів із багаторівневим сторожовим контролем, що на відміну від традиційних watchdog-схем, які реагують лише після зупинки або зависання, дозволяє завчасно оцінювати ризик відмови та локально програмно ініціювати апаратний перезапуск з формалізацією індексу стану, перехідних ймовірностей та політик ескалації, зберігаючи при цьому низьку обчислювальну складність, придатну для мікроконтролерів у реальному часі;

4) набув подальшого розвитку метод виявлення фальсифікацій та аномалій у комп'ютерних системах для сигналів КФС на основі модифікованого комбінованого фільтра Калмана з подієвим перемиканням режимів, який, на відміну від поширених багатомодельних або адаптивних фільтрів, не потребує одночасного запуску набору моделей і забезпечує селективне пригнічення підозрілих вимірів на основі аналізу інновацій, що дає змогу відрізнити нормальні режимні зміни від зловмисних відхилень шляхом оперативної зміни режиму оцінювання, зберігати низьку обчислювальну складність, необхідну для мікроконтролерів у системах реального часу, забезпечувати швидке реагування, зменшувати кількість хибних тривог і робить метод придатним до впровадження у ресурсообмежених КФС.

4. Аналіз основного змісту дисертації

У вступі обґрунтовано актуальність дослідження, зумовлену необхідністю підвищення ефективності використання ресурсів, надійності та безперервності функціонування операційних систем реального часу для кіберфізичних систем в умовах інтенсивних змін станів. Визначено мету, об'єкт, предмет і завдання дослідження, наведено наукову новизну та практичне значення одержаних результатів, а також відображено зв'язок роботи з науковими дослідженнями та приклади впровадження.

У першому розділі здійснено аналіз предметної області дослідження. Розглянуто особливості функціонування ОСРЧ у кіберфізичних системах, підходи до планування задач, забезпечення відмовостійкості, прогнозування збоїв, виявлення аномалій і фальсифікацій. Проаналізовано сучасні методи моніторингу, самовідновлення та захисту від зловмисних впливів, визначено їх переваги, обмеження та невирішені проблеми.

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

У третьому розділі запропоновано метод превентивного відновлення компонентів ОСРЧ на основі низькорозмірної марковської моделі та багаторівневого сторожового контролю. Також розроблено метод виявлення фальсифікацій і аномалій у сигналах кіберфізичних систем на основі модифікованого комбінованого фільтра Калмана з подієвим перемиканням режимів. Наведено формалізацію методів та алгоритми їх реалізації.

У четвертому розділі наведено результати експериментальної перевірки запропонованої архітектури та розроблених методів на базі FreeRTOS і мікроконтролерної платформи STM32F407. Подано опис експериментального стенда, реалізації методів у складі прототипу ОСРЧ та результати досліджень, які підтвердили підвищення ефективності використання ресурсів, скорочення часу простою та покращення стійкості системи до збоїв і зловмисних впливів.

У висновках узагальнено основні теоретичні та практичні результати проведеного дослідження.

У додатках наведено наукові праці, в яких відображено результати дисертаційного дослідження, акти впровадження, а також лістинг програмного забезпечення.

5. Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій.

Наукові положення, висновки і рекомендації дисертації обґрунтовані коректним та доцільним використанням математичного апарату тензорного аналізу, марковського моделювання, методів фільтрації та алгоритмів адаптивного керування, розробленими методами динамічного розподілу задач і ресурсів, превентивного відновлення компонентів ОСРЧ та виявлення аномалій і фальсифікацій у сигналах кіберфізичних систем, успішною програмно-апаратною реалізацією запропонованих рішень, практичним впровадженням результатів дисертаційного дослідження в організаціях та освітньому процесі, що підтвердило узгодженість теоретичних положень із результатами експериментального застосування, а також апробацією результатів на міжнародних і всеукраїнських наукових конференціях.

6. Практичне значення отриманих результатів

За результатами виконаних досліджень здобувачем удосконалено архітектуру планувальника задач операційної системи реального часу шляхом залучення зовнішнього модуля машинного навчання, а також розроблено 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.

Застосування методу динамічного розподілу задач і ресурсів в ОСРЧ на основі тензорної декомпозиції забезпечило підвищення ефективності використання обчислювальних ресурсів. За результатами двох серій експериментів інтегральний показник ефективності становив 5,19 %, що

підтвердило доцільність використання запропонованого підходу в умовах обмежених ресурсів мікроконтролерних платформ.

Застосування методу превентивного відновлення компонентів ОСРЧ на основі низькорозмірної марковської моделі та дворівневого програмно-апаратного сторожового механізму дозволило зменшити частку простою системи з 4,5 % до 1,37 %, тобто скоротити простій на 69,63 % і прискорити відновлення у 3,29 раза порівняно з традиційним апаратним сторожовим таймером. Додаткове навантаження на процесор при цьому не перевищувало 1,4 %

Також підтверджено в експериментальних дослідженнях 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 та перевищив результати класичного, адаптивного, H_{∞} та подієво-керованого фільтрів Калмана.

Теоретичні та практичні результати дослідження впроваджено в діяльність ТОВ «ДЕВІКС ДІДЖИТАЛ», ТОВ «Nolt Technologies», ТОВ «Ультра ІТ», а також в освітній процес Хмельницького національного університету на кафедрі комп'ютерної інженерії та інформаційних систем при викладанні дисциплін «Технічна діагностика і надійність комп'ютерних пристроїв» і «Безпека та захист комп'ютерних систем». Крім того, результати дослідження впроваджено в освітній процес у блоці військово-спеціальних дисциплін та використано при удосконаленні навчально-лабораторного комплексу другої кафедри Другого навчально-наукового інституту Військової академії імені Євгена Березняка.

7. Особистий внесок здобувача полягає в удосконаленні архітектури планувальника задач операційної системи реального часу шляхом залучення зовнішнього аналітичного модуля, а також у розробленні методів 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. Усі основні наукові та прикладні результати дисертаційної роботи отримані здобувачем самостійно. За результатами проведених досліджень основні наукові результати опубліковано у 6 наукових статтях у фахових наукових журналах України. Апробація засвідчена публікаціями 3 праць в

матеріалах міжнародних та всеукраїнських конференцій, з яких три праці індексовані у наукометричній базі Scopus. Опубліковано 1 свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір (програму).

8. Структура та обсяг дисертації.

Дисертаційна робота складається з анотації, змісту, переліку умовних скорочень, вступу, чотирьох розділів, висновку, списку використаних джерел та п'яти 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 джерела – на 21 стор., додатки – на 89 стор. Дисертація містить 28 рисунків та 10 таблиць.

. Зауваження.

У роботі зазначено, що запропонована архітектура допускає можливість інтеграції зовнішнього аналітичного модуля безпосередньо до складу кіберфізичної системи за наявності достатніх обчислювальних ресурсів. Разом із тим, для повнішого обґрунтування практичної гнучкості підходу доцільно було б більш детально окреслити умови такого перенесення, зокрема вимоги до обчислювального ресурсу платформи, допустимого фону навантаження та механізмів недопущення впливу аналітичного модуля на детермінованість виконання задач реального часу.

Експериментальні результати подано достатньо інформативно, однак більш явне розмежування основних і допоміжних метрик оцінювання зробило б їх інтерпретацію ще простішою. Наприклад можна було б окремо позначити, яка з них характеризує точність, а яка - стійкість до хибних тривог, не лише в тексті, а й у компактному підсумку.

У табличному матеріалі четвертого розділу не скрізь витримано єдиний стиль оформлення. Зокрема, у табл. 4.1 заголовок стовпця «Середньоквадратичне Відхилення(м)» оформлено не зовсім уніфіковано: назва розбита на два рядки, друге слово починається з великої літери, а перед дужкою відсутній пробіл. Такі неточності не впливають на зміст, але помітні при читанні.

У підрозділі 4.2, присвяченому експериментальній перевірці методу превентивного відновлення, наведено низку важливих показників, зокрема час виявлення збою, середній час відновлення, коефіцієнт готовності та частку глобальних перезапусків. Разом із тим, для підвищення наочності

сприйняття результатів доцільно було б подати ці метрики також у вигляді узагальнювальної порівняльної таблиці для традиційного та запропонованого підходів.

Порівняльна оцінка ефективності комбінованого фільтра Калмана виконана за інтегральним показником, що агрегує середньоквадратичну похибку, процесорне навантаження та кількість хибних спрацювань. Разом із тим, для різних класів кіберфізичних систем доцільним могло б бути окреме обґрунтування вибору саме такого набору критеріїв і їх відносної вагомості в експериментальній частині.

У списку публікацій та списку використаних джерел не завжди повністю уніфіковано подання сторінок і розділових знаків, зокрема в одних позиціях використано формат «С. 459 – 466», в інших — «С. 426-433». Бажано було б витримати єдиний редакційний стандарт оформлення бібліографічних описів.

Однак зазначені зауваження не є принциповими, істотно не впливають на зміст дисертаційної роботи та не знижують її наукової та практичної цінності.

10. Загальний висновок.

Таким чином, дисертаційна робота Козельського Олександра Володимировича на тему «Методи та засоби планування задач і підвищення ефективності операційних систем реального часу» є завершеним самостійним науковим дослідженням, у якому розв'язано актуальне науково-прикладне завдання та одержано нові теоретичні і практичні результати, важливі для розвитку галузі комп'ютерної інженерії. Усі положення та результати, винесені на захист, є достовірними, аргументованими й отриманими автором особисто.

Тому, з огляду на вище вказане, вважаю, що дисертаційна робота 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 _____ Андрій НІЧЕПОРУК

«Підпис Андрія НІЧЕПОРУКА засвідчую»:

Проректор з наукової роботи

Хмельницького національного університету _____ Олег СИНЮК

