

ВИСНОВОК**про наукову новизну, теоретичне та практичне значення
результатів дисертації**

на тему «Методи та засоби планування задач і підвищення ефективності
операційних систем реального часу»

(назва роботи)

здобувача наукового ступеня доктора філософії

Козельського Олександра Володимировича

(прізвище, ім'я, по батькові)

з галузі знань 12 Інформаційні технології

(шифр, назва галузі знань)

за спеціальністю 123 Комп'ютерна інженерія.

(шифр, назва спеціальності)

Публічна презентація проведена на кафедрі комп'ютерної інженерії та
інформаційних систем

(назва)

« 16 » березня 2026 року, протокол №20.

1. Актуальність теми дослідження. Стрімкий розвиток кіберфізичних систем, Інтернету речей та інтелектуальних вбудованих пристроїв зумовлює потребу у створенні нових методів синтезу операційних систем реального часу, здатних забезпечувати високу продуктивність, гнучкість, відмовостійкість і кіберстійкість в умовах інтенсивних змін станів. Традиційні архітектури ОСРЧ мають обмежену адаптивність, не враховують динаміку навантаження та не здатні своєчасно реагувати на приховані відмови або зовнішні впливи. Класичні планувальники задач ОСРЧ спираються на локальні статичні критерії (пріоритет, дедлайн, період), що не дозволяє врахувати багатовимірну динаміку системного навантаження та довготривалі кореляції між задачами. Водночас інтеграція складних аналітичних методів безпосередньо в мікроконтролер обмежена жорсткими часовими вимогами та ресурсами.

Зростання складності апаратного середовища, паралельність обчислень і підвищені вимоги до безпеки призводять до неможливості ефективного використання класичних статичних або реактивних механізмів планування й моніторингу. Актуальність дослідження зумовлена необхідністю розроблення нових підходів до організації обчислювальних процесів у реальному часі, які поєднують аналітичні, стохастичні та інтелектуальні методи.

Проведений аналіз архітектур, методів планування, відмовостійкості та виявлення аномалій в операційних системах реального часу для кіберфізичних систем показав:

1. Класичні ОСРЧ та алгоритми планування (EDF, RMS) є переважно реактивними та не забезпечують своєчасного реагування в умовах інтенсивних і стохастичних змін станів, що призводить до пропуску дедлайнів ще до моменту детекції проблеми.

2. Існуючі методи кластеризації та балансування навантаження (TDM, ML, генетичні та графові підходи) мають суттєві обмеження щодо адаптивності, масштабованості або обчислювальної складності, що унеможлиблює їх пряме застосування в ОСРЧ з обмеженими ресурсами.

3. Традиційні механізми відмовостійкості (HW WDT, резервування, формальні методи) не забезпечують превентивного відновлення: або реагують уже після збою, або вимагають значних апаратних і енергетичних витрат.

4. Методи машинного навчання та багатомодельні підходи до виявлення збоїв і атак є надмірно ресурсоємними для мікроконтролерних платформ та складними для сертифікації у критичних КФС.

5. Існуючі методи виявлення фальсифікацій на основі фільтрів Калмана недостатньо робастні до швидких режимних змін і цілеспрямованих атак або потребують значних обчислювальних ресурсів.

Через це, розробка методів синтезу операційних систем реального часу, здатних динамічно реагувати на інтенсивні зміни станів, прогнозувати відмови, адаптивно перерозподіляти ресурси та забезпечувати кіберстійкість у складних апаратних і інформаційних середовищах, є актуальною науковою задачею.

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

Дисертаційне дослідження виконувалось у рамках науково-дослідної тематики Хмельницького національного університету, зокрема держбюджетної науково-дослідної теми № 2Б-2024 «Система виявлення зловмисного програмного забезпечення 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), в яких автор дисертації був виконавцем.

3. Наукова новизна отриманих результатів.

У дисертації вперше одержані такі нові наукові результати:

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.

(наводяться нові наукові результати)

4. Теоретичне та практичне значення результатів дисертації. За результатами виконаних досліджень створено науково обґрунтовані методи і програмно-апаратні засоби підвищення надійності, кіберстійкості, адаптивності та ефективності ОСРЧ, призначених для кіберфізичних систем із інтенсивними змінами станів.

Розроблений метод інтелектуальної кластеризації на основі тензорної декомпозиції забезпечує можливість багатовимірного аналізу даних про процеси, ресурси та взаємозв'язки у реальному часі. Завдяки використанню тензорного подання, кластеризація враховує часові, просторові та функціональні залежності між завданнями ОСРЧ. Це дозволяє виявляти приховані закономірності у навантаженні, прогнозувати поведінку системи

та динамічно перерозподіляти ресурси між обчислювальними вузлами. За результатами експериментальних досліджень встановлено, що використання методу тензорної декомпозиції в середовищі FreeRTOS приводить до зменшення завантаження процесора на 14,92%, скорочення споживання пам'яті на 7,72% та зниження часу виконання задач на 12,62%. Для комплексної оцінки отриманих результатів було введено інтегральний показник ефективності, значення якого для запропонованого підходу склало 11,76%.

Запропонована дворівнева модель забезпечення відмовостійкості, що поєднує АСТ із програмним модулем прогнозування на основі Марковських ланцюгів, реалізує принцип проактивного виявлення та локального усунення відмов. Програмний рівень виконує ймовірнісний моніторинг станів завдань і черг повідомлень, обчислює ризики деградації та, у разі потреби, ініціює локальне відновлення окремих компонентів без перезапуску всієї системи. Експериментальні результати показали, що запропонований підхід забезпечує скорочення сумарного часу простою системи приблизно на 69,63% та прискорює процес відновлення після збоїв у 3,29 рази порівняно з використанням лише традиційного апаратного сторожового таймера.

Розроблено комбінований фільтр Калмана (ККФ) для задач моніторингу і стабілізації динаміки системи в умовах стохастичних шумів і невизначеностей. Запропонований варіант працює у комбінованому режимі з перемиканнями станів, що дозволяє коригувати оцінку параметрів при виникненні різких змін чи аномалій. Результати експериментальних досліджень, узагальнені за інтегральним показником, що враховує середньоквадратичну похибку оцінювання, кількість хибних спрацювань та обчислювальні витрати, засвідчили, що комбінований фільтр Калмана має найвищий рівень ефективності з інтегральним значенням $I = 9,17$, перевищуючи за сукупними характеристиками адаптивний фільтр Калмана приблизно на 21,9%.

Всі отримані результати реалізовано у вигляді експериментального прототипу ОСРЧ, що підтвердив працездатність запропонованих методів у практичних умовах. Розроблені рішення можуть бути застосовані у вбудованих і розподілених системах керування, автономних робототехнічних, транспортних, енергетичних та медичних кіберфізичних системах.

5. Використання результатів роботи Теоретичні та практичні результати дослідження впроваджені при розробці програмних компонентів посилення захисту кіберфізичних систем ТОВ Ультра ІТ (Акт від 16.03.2026), ТОВ ДЕВІКС ДІДЖИТАЛ (Акт від 13.03.2026), ТОВ Nolt technologies (Акт від 13.03.2026), при викладанні військово-спеціальних дисциплін і удосконалення навчально-лабораторного комплексу другої кафедри Другого навчально-наукового інституту Воєнної академії імені Євгенія Березняка (Акт від 18.12.2025), а також, в освітньому процесі Хмельницького національного університету (Акт від 16.03.2025) на кафедрі комп'ютерної інженерії та

інформаційних систем при викладанні дисциплін «Технічна діагностика і надійність комп'ютерних пристроїв», «Безпека та захист комп'ютерних систем»

6. Особиста участь автора в одержанні наукових та практичних результатів, що викладені в дисертаційній роботі всі основні результати дисертаційного дослідження, які представлені до захисту, отримані автором особисто.

Дисертаційна робота виконана на кафедрі комп'ютерної інженерії та інформаційних систем Хмельницького національного університету _____,
(назва кафедри (відділу), назва установи)

наукові керівники: доктор філософії Савенко Богдан Олегович - Хмельницький національний університет та д.т.н., професор Коробчинський Максим Володимирович, Воєнна академія імені Євгенія Березняка, (МОУ).
(науковий ступінь, вчене звання, посада, прізвище, ініціали)

Розглянувши звіт подібності щодо перевірки на плагіат, встановлено, що дисертаційна робота Козельського О.В. _____
(прізвище, ініціали здобувача)

є результатом самостійних досліджень здобувача і не містить елементів плагіату та запозичень. Використані ідеї, результати і тексти інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

Дисертація характеризується єдністю змісту та відповідає вимогам щодо її оформлення.

7. Перелік публікацій за темою дисертації із зазначенням особистого внеску здобувача:

1. Козельський О., Савенко Б. Виявлення фальсифікацій та аномалій у цифрових сигналах від кіберфізичних систем на основі комбінованого фільтра Калмана. Information Technology: Computer Science, Software Engineering and Cyber Security, 2025. №2. С. 23–35. DOI: <https://doi.org/10.32782/IT/2025-2-4> - розробка методу виявлення фальсифікацій та аномалій у цифрових сигналах від кіберфізичних систем на основі комбінованого фільтра Калмана.

2. Козельський О.В. Метод тензорної декомпозиції для адаптивного розподілу ресурсів у системах реального часу. Measuring and computing devices in technological processes. 2025. №82(2). С. 426-433. DOI: <https://doi.org/10.31891/2219-9365-2025-82-61>

3. Козельський О., Савенко Б. Дворівнева стратегія підвищення відмовостійкості операційних систем реального часу з використанням ймовірнісного аналізу. Herald of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences. 2025. №353(3.2). С. 438-446. DOI: <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-353-60> - розробка дворівневої стратегії підвищення відмовостійкості операційних систем реального часу з використанням ймовірнісного аналізу.

4. Козельський О., Савенко Б. Зовнішня адаптивна система кластеризації для підвищення гнучкості операційних систем реального часу на основі динамічного планування завдань. Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки.

Том 5. 2025. С. 124-132 DOI: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.5.2/18> - розробка зовнішньої адаптивної системи кластеризації для підвищення гнучкості операційних систем реального часу на основі динамічного планування завдань.

5. Козельський О., Савенко О. Проактивний механізм інформаційної безпеки в операційних системах реального часу з використанням гібридного сторожового таймера. *Measuring and computing devices in technological processes*. 2025. №83(3). С. 459 – 466. DOI: <https://doi.org/10.31891/2219-9365-2025-83-57> - розробка проактивного механізму інформаційної безпеки в операційних системах реального часу з використанням гібридного сторожового таймера.

6. Козельський О., Савенко О. Виявлення зловмисних атак на сенсори та підробки телеметрії в кіберфізичних системах на основі модифікованого фільтра Калмана. *Measuring and computing devices in technological processes*. 2025. №84(4). С. 228–235. DOI: <https://doi.org/10.31891/2219-9365-2025-84-24> - розробка методу виявлення зловмисних атак на сенсори та підробки телеметрії в кіберфізичних системах на основі модифікованого фільтра Калмана.

7. Козельський О.В. Методи та засоби створення мультикомп'ютерних систем з подвійною автентифікацією потоків даних в корпоративних мережах. *Актуальні проблеми комп'ютерних наук: Збірник наукових праць. Матеріали XV Всеукраїнської науково-практичної конференції «Актуальні проблеми комп'ютерних наук АПКН-2023»*, Україна, Хмельницький, ХНУ, листопад 17-18, 2023. С. 142–145. URL: <https://kn.khmnu.edu.ua/wp-content/uploads/sites/18/apkn-2023-corporpaper.pdf>

8. Козельський О.В. Модель системи адаптивної кластеризації даних із зовнішнім модулем аналізу для архітектури ОС реального часу при динамічних змінах станів. *Актуальні проблеми комп'ютерних наук: Збірник наукових праць, Матеріали XVI Всеукраїнської науково-практичної конференції «Актуальні проблеми комп'ютерних наук АПКН-2024»*, Україна, Хмельницький, ХНУ, листопад 15-16, 2024. С. 272 – 274. URL: <https://kn.khmnu.edu.ua/wp-content/uploads/sites/18/apkn-2024-corporpaper.pdf>

9. Kozelskiy O., Kashtalian A., Stetsyuk V., Martiniuk D., Sachenko A. *A model of an intelligent clustering system with an external module for the architecture of RTOS with intensive changes of states regarding their flexibility and balancing. 1st International Workshop on Advanced Applied Information Technologies: (AdvAIT-2024)*, Khmelnytskyi, Ukraine and Zilina, Slovakia, December 5, 2024. Vol. 3899. P. 234-243. URL: <https://ceur-ws.org/Vol-3899/paper21.pdf> (Scopus) - розробка моделі інтелектуальної системи кластеризації з зовнішнім модулем для архітектури операційних систем реального часу з інтенсивними змінами станів з погляду їх гнучкості та балансування

10. Kozelskiy O., Drozd A., Savenko B., Gaj P. *A model for probabilistic monitoring and proactive restart of real-time operating systems under intensive state changes in cyber-physical systems. 2nd International Workshop on Intelligent & CyberPhysical Systems: (ICyberPhyS 2025)*, Khmelnytskyi, Ukraine, July 4, 2025.

Vol. 4013. P. 198-210. URL: <https://ceur-ws.org/Vol-4013/paper16.pdf> (Scopus) - розробка моделі імовірнісного моніторингу та превентивного перезапуску операційних систем реального часу в умовах інтенсивних змін станів у кіберфізичних системах.

11. Piotr Gaj, Tomas Sochor, Maksym Korobchynskiy, Bohdan Savenko, Oleksandr Kozelskiy. Hybrid Method for Protecting RTOS from Failures and Cyberattacks Using Compact Markov Models. The International Workshop on Applied Intelligent Security Systems in Law Enforcement (AISSLE-2025), Vinnytsia, Ukraine, October, 30 – November, 02, 2025. Vol. 4126. pp. 361-376. URL: <https://ceur-ws.org/Vol-4126/paper19.pdf> (Scopus) - розробка гібридного методу захисту операційних систем реального часу від відмов і кібератак з використанням компактних марковських моделей.

12. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір №141525. Комп'ютерна програма «Програмне забезпечення аналізатора імовірності відмов у реальному часі для операційних систем кіберфізичних систем з інтенсивними змінами станів (АІВРЧ)» / О.В. Козельський, Б.О. Савенко. Дата реєстрації 17.12.2025. URL: <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1897556/> - розробка програмного застосунку для аналізатора імовірності відмов у реальному часі для операційних систем кіберфізичних систем з інтенсивними змінами станів.

За результатами досліджень опубліковано 12 наукових праць, у тому числі 0 монографій, 6 статей у наукових фахових виданнях (з них 3 статті у періодичних наукових виданнях інших держав, які входять до ОЕСР та/або Європейського Союзу, фахових виданнях України категорії «А», або закордонних виданнях, що входять до WoS або Scopus) 1 патентів України, 5 тез доповідей в збірниках матеріалів конференцій.

(Далі роботи наводяться у такому порядку: монографії, статті у наукових фахових виданнях, інших виданнях, авторські свідоцтва, патенти, матеріали конференцій;

При наведенні статей у фахових виданнях вказується, які з них надруковано у виданнях держав, що входять до ОЕСР, ЄС, фахових виданнях України категорії «А», або закордонних виданнях, що входять до WoS або Scopus.

(Після кожної роботи, яка опублікована зі співавторами, наводиться також особистий внесок здобувача.).

ВВАЖАТИ, що дисертаційна робота Козельського О.В.

(прізвище, ініціали здобувача)

«Методи та засоби планування задач і підвищення ефективності операційних систем реального часу»,

(назва)

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, та відповідає напрямку наукового дослідження освітньо-наукової програми Хмельницького національного університету зі спеціальності 123 Комп'ютерна інженерія.

(шифр, назва)

РЕКОМЕНДУВАТИ:

Дисертаційну роботу «Методи та засоби планування задач і підвищення ефективності операційних систем реального часу»,

назва роботи

подану Козельським Олександром Володимировичем

прізвище, ім'я, по батькові

на здобуття ступеня доктора філософії, до захисту.

Головуючий публічної презентації
(завідувач кафедри):

доктор філософії

(науковий ступінь,

доцент

вчене звання, посада)



Ольга ПАВЛОВА

Ім'я ПРИЗВИЩЕ