

АНОТАЦІЯ

Козельський О. В. Методи та засоби планування задач і підвищення ефективності операційних систем реального часу. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 123 – Комп'ютерна інженерія. – Хмельницький національний університет, Хмельницький, 2026.

У дисертації здійснено аналіз методів планування задач і підвищення ефективності операційних систем реального часу (ОСРЧ). У роботі удосконалено архітектуру планувальника задач шляхом залучення зовнішнього модуля машинного навчання, розроблено метод динамічного розподілу задач і ресурсів в ОСРЧ на основі тензорної декомпозиції, метод превентивного відновлення компонентів ОСРЧ, а також метод виявлення фальсифікацій та аномалій у комп'ютерних системах для сигналів кіберфізичних систем (КФС) на основі модифікованого комбінованого фільтра Калмана з подієвим перемиканням режимів при збереженні детермінованості виконання задач реального часу.

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 КФС.

Метою дисертаційного дослідження є підвищення ефективності використання ресурсів, безперервності та надійності роботи ОСРЧ у КФС з інтенсивними змінами станів шляхом розроблення методів адаптивного планування, динамічного розподілу ресурсів, превентивного відновлення, виявлення аномалій та фальсифікацій.

Наукова новизна отриманих 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 відрізняти 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.

Практичне значення отриманих результатів. За результатами виконаних досліджень здобувачем удосконалено архітектуру планувальника задач шляхом залучення зовнішнього модуля машинного навчання, з адаптивним керуванням розподілу задач і ресурсів без збільшення навантаження на мікроконтролер і без порушення детермінованості виконання задач реального часу. Це дало змогу створювати ОСРЧ з покращеними характеристиками використання обчислювальних ресурсів, що проявляється у зменшенні сумарного часу виконання задач, зниженні навантаження на процесор і скороченні використання оперативної пам'яті під час роботи системи.

Застосування методу динамічного розподілу задач і ресурсів в ОСРЧ на основі тензорної декомпозиції забезпечило покращення використання обчислювальних ресурсів за рахунок більш рівномірного розподілу обчислювальних фаз задач у часі. За результатами першої серії експериментів середнє значення завантаженості процесора зменшилося на 3,94 %, середній час виконання задач зменшився на 10,86 %, тоді як використання пам'яті збільшилося на 0,87 %. У другій серії експериментів зниження використання процесора становило 13,08 %, зменшення часу виконання задач становило 3,61 %, при збільшенні використання пам'яті на 0,51 %. Інтегральний показник ефективності, визначений як середнє відносне покращення показників використання процесора, пам'яті та часу виконання задач, за результатами двох серій експериментів становив 5,19 %, що підтверджує доцільність застосування

запропонованого методу для підвищення ефективності функціонування ОСРЧ в умовах обмежених обчислювальних ресурсів.

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 %, що відповідає скороченню простою на 69,63 % та прискоренню відновлення у 3,29 раза порівняно з традиційним апаратним сторожовим таймером. Додаткове навантаження на процесор не перевищувало 1,4 %.

Застосування методу виявлення фальсифікацій та аномалій у сигналах КФС на основі модифікованого комбінованого фільтра Калмана з подієвим перемиканням режимів дозволило підвищити ефективність виявлення аномалій та фальсифікацій при умовах ЗПЗ у цифрових сигналах, забезпечивши найвищу інтегральну ефективність ($I = 9,17$) серед порівнюваних методів, перевищивши класичний фільтр Калмана (5,71), адаптивний фільтр Калмана (7,52), H_∞ -фільтр (1,71) та подієво-керований фільтра Калмана (5,18). При цьому відносна ефективність запропонованого методу порівняно з адаптивним фільтром Калмана, який показав найкращу ефективність серед інших зросла приблизно на 21,94%.

Теоретичні та практичні результати дослідження впроваджені у прототипі ОСРЧ на базі STM32F407 з використанням FreeRTOS в ТОВ Ультра ІТ (Акт від 13.11.2025), ТОВ ДЕВІКС ДІДЖИТАЛ (Акт від 18.11.2025), ТОВ Nolt technologies (Акт від 30.12.2025), в освітньому процесі Хмельницького національного університету (Акт від 02.12.2025) на кафедрі комп'ютерної інженерії та інформаційних систем при викладанні дисциплін «Технічна діагностика і надійність комп'ютерних пристроїв», «Безпека та захист комп'ютерних систем», 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 (Акт від 18.12.2025).

У вступі обґрунтовано актуальність дослідження, пов'язану з потребою підвищення ефективності, надійності та захисту ОСРЧ в КФС з інтенсивними змінами станів. Визначено мету, завдання, об'єкт і предмет дослідження, спрямовані на створення самоадаптивних ОСРЧ, здатних прогнозувати збої, ефективно використовувати ресурси та протидіяти зловмисним впливам. Подано наукову новизну, висвітлено практичне значення отриманих результатів, а також представлено зв'язок тематики дослідження з науковими напрямками, у межах яких працюють відомі дослідники цієї проблеми.

У першому розділі подано аналітичний огляд сучасних ОСРЧ та КФС, розглянуто їх архітектурні особливості, класифікацію, підходи до планування задач і забезпечення відмовостійкості. Проаналізовано існуючі методи моніторингу, самовідновлення та захисту від зловмисних впливів, визначено їх обмеження в умовах інтенсивних змін станів. Узагальнено результати досліджень вітчизняних і зарубіжних учених у сфері підвищення надійності й ефективності ОСРЧ. На основі аналізу сформульовано проблему, яку не розв'язують відомі підходи, та обґрунтовано необхідність розроблення нових методів синтезу ОСРЧ, здатних до самоадаптації, інтелектуальної кластеризації задач і проактивного захисту системи.

У другому розділі викладено концептуальні засади удосконалення архітектури ОСРЧ з планувальником задач шляхом залучення зовнішнього аналітичного модуля, а також визначено вимоги до її ефективності, надійності та захищеності в умовах інтенсивних змін станів. Розроблено структурну модель взаємодії компонентів ОСРЧ, описано принципи інтеграції підсистем моніторингу, планування, самовідновлення та аналізу даних. Детально розглянуто метод динамічного розподілу задач і ресурсів на основі тензорної декомпозиції та архітектуру планувальника із зовнішнім модулем, що приймає дані з ОСРЧ, здійснює їх обробку засобами машинного навчання та передає оновлені параметри для подальшої самоадаптації системи. Представлено можливість як зовнішнього, так і внутрішнього розміщення аналітичного модуля без порушення детермінованості системи. У результаті здійснено розроблення інтеграції

механізмів тензорного аналізу, кластеризації та адаптивного керування у структуру сучасних ОСРЧ.

У третьому розділі подано методи прогнозування збоїв, превентивного перезапуску компонентів і виявлення аномалій та фальсифікацій у цифрових сигналах ОСРЧ. Запропоновано марковську модель прогнозування станів системи, яка дає змогу оцінювати ймовірності переходів між станами системи та реалізовувати локальне відновлення компонентів без повного перезапуску, що забезпечує відмовостійкість системи. Розроблено комбінований фільтр Калмана з подієвим режимом роботи, адаптивним перемиканням моделей і модулем виявлення аномалій. Метод формалізовано як гібридну систему з перемиканнями та подано алгоритм, що виконує прогнозування, аналіз інновацій, перевірку порогів і реакцію системи у разі виявлення аномалій або атак.

У четвертому розділі подано експериментальні дослідження запропонованих методів і рішень у складі операційної системи реального часу для КФС. Описано створення прототипу на базі FreeRTOS із реалізованими механізмами інтелектуальної кластеризації, дворівневої відмовостійкості та комбінованого фільтра Калмана. Наведено результати випробувань роботи мікроконтролера, які підтвердили підвищення ефективності розподілу ресурсів, зменшення часу простою та стійкість системи до збоїв і зловмисних впливів. Узагальнено результати експериментів і зроблено висновок про практичну придатність розроблених методів для застосування у вбудованих і КФС.

У висновку узагальнено результати дослідження, підтверджено досягнення поставленої мети, сформульовано основні наукові та практичні результати.

У додатках наведено перелік наукових праць, в яких представлено наукові результати дослідження, акти впровадження, лістинг програмного забезпечення, таблиці, що містять результати експериментів.

Ключові слова: операційна система реального часу, кіберфізична система, інтелектуальна кластеризація, тензорна декомпозиція, відмовостійкість, сторожовий

таймер, ланцюг Маркова, комбінований фільтр Калмана, самовідновлення, захист від зловмисного впливу, датчики, інтернет речей, моніторинг.

ANNOTATION

Kozelskyi O. V. Methods and Means for Task Scheduling and Efficiency Improvement in Real-Time Operating Systems. – Qualification research paper (manuscript).

Dissertation for obtaining the Doctor of Philosophy degree in specialty 123 – Computer Engineering. – Khmelnytskyi National University, Khmelnytskyi, 2026.

The dissertation analyzes methods of task scheduling and efficiency improvement in real-time operating systems (RTOS). The work improves the architecture of the task scheduler through the integration of an external machine learning module, develops a method for dynamic allocation of tasks and resources in RTOS based on tensor decomposition, a method for preventive recovery of RTOS components, as well as a method for detecting falsifications and anomalies in computer systems for signals of cyber-physical systems (CPS) based on a modified combined Kalman filter with event-driven mode switching while preserving the determinism of real-time task execution.

The object of research is the processes of functioning of real-time operating systems in cyber-physical systems under conditions of intensive state changes.

The subject of research is methods and tools for adaptive task scheduling and resource allocation based on multidimensional workload analysis, preventive recovery of components using state prediction, as well as detection of anomalies and falsification of sensor data in RTOS for CPS.

The purpose of the dissertation research is to improve the efficiency of resource utilization, as well as the continuity and reliability of RTOS operation in cyber-physical systems with intensive state changes by developing methods for adaptive scheduling, dynamic resource allocation, preventive recovery, and detection of anomalies and falsifications.

The scientific novelty of the obtained results is as follows:

1) *an improved architecture* of the task scheduler incorporating an external machine learning module has been developed. Unlike traditional RTOS architectures, it enables analytical computations to be offloaded outside the microcontroller and establishes a feedback channel for self-adaptation. This approach ensures the collection of multidimensional telemetry, its transformation into tensor representations, and the adaptive updating of scheduler parameters without user intervention. As a result, the system can account for multidimensional workload dynamics during resource management, overcoming limitations imposed by the computational resources of microcontroller platforms while preserving deterministic task execution within the critical real-time loop;

2) *for the first time*, a method for dynamic task and resource allocation in RTOS based on tensor decomposition has been developed, which uses multidimensional models of system workload to predict task behavior considering interrelations between parameters and subsequently form decisions based on their comprehensive analysis. Unlike existing resource allocation algorithms that rely mainly on one-dimensional metrics or local task characteristics, the proposed method makes it possible to reduce execution time, decrease processor load, and improve the efficiency of system resource utilization;

3) *for the first time*, a method for preventive recovery of RTOS components has been developed that combines a low-dimensional Markov state-prediction model with multi-level watchdog supervision. Unlike traditional watchdog schemes that react only after a halt or freeze has occurred, the proposed approach enables early assessment of failure risk and local software-initiated hardware reset, with formalization of a state index, transition probabilities, and escalation policies, while maintaining low computational complexity suitable for real-time microcontrollers;

4) the method for detecting falsifications and anomalies in computer systems for CPS signals has been further developed based on a modified combined Kalman filter with event-driven mode switching which, unlike widely used multimodel or adaptive filters, does not require the simultaneous execution of multiple models and provides selective suppression

of suspicious measurements through innovation analysis, enabling the distinction between normal mode changes and malicious deviations via instantaneous switching of the estimation regime while preserving the low computational complexity required for real-time microcontrollers, ensuring rapid response, reducing false alarms, and making the method suitable for deployment in resource-constrained CPS.

Practical significance of the obtained results. As a result of the conducted research, the applicant has improved the architecture of the task scheduler by incorporating an external machine learning module, enabling adaptive management of task and resource allocation without increasing the load on the microcontroller and without violating the determinism of real-time task execution. This made it possible to design real-time operating systems with improved efficiency of computational resource utilization, manifested in a reduction of the total task execution time, decreased processor load, and reduced RAM usage during system operation.

The application of the method for dynamic allocation of tasks and resources in an RTOS based on tensor decomposition ensured improved utilization of computational resources through a more uniform distribution of computational phases of tasks over time. According to the results of the first experimental series, the average CPU utilization decreased by 3.94%, the average task execution time decreased by 10.86%, while memory usage increased by 0.87%. In the second experimental series, CPU utilization decreased by 13.08%, task execution time decreased by 3.61%, while memory usage increased by 0.51%. The integral efficiency indicator, defined as the average relative improvement of CPU utilization, memory usage, and task execution time metrics, amounted to 5.19% based on the results of the two experimental series. This confirms the feasibility of applying the proposed method to improve the efficiency of RTOS operation under limited computational resources.

The application of the method for preventive recovery of RTOS components based on a low-dimensional Markov model and a two-level hardware–software watchdog mechanism reduced system downtime from 4.5% to 1.37%, corresponding to a 69.63%

reduction in downtime and a 3.29-fold decrease in recovery time compared to a conventional hardware watchdog timer. The additional CPU overhead did not exceed 1.4%.

The application of the method for detecting falsification and anomalies in CPS signals based on a modified hybrid Kalman filter with event-driven mode switching made it possible to improve the effectiveness of anomaly and falsification detection under intentional interference conditions in digital signals, achieving the highest integral efficiency ($I = 9.17$) among the compared methods, exceeding the classical Kalman filter (5.71), the adaptive Kalman filter (7.52), the H_∞ filter (1.71), and the event-triggered Kalman filter (5.18). At the same time, the relative efficiency of the proposed method compared to the adaptive Kalman filter, which demonstrated the best performance among the other baseline methods, increased by approximately 21.94%.

The theoretical and practical results of the research were implemented in a RTOS prototype based on the STM32F407 using FreeRTOS in Ultra IT LLC (Act of 13.11.2025), DEVIX DIGITAL LLC (Act of 18.11.2025), Nolt technologies LLC (Act of 30.12.2025), in the educational process of the Khmelnytskyi National University (Act of 02.12.2025) at the Department of Computer Engineering and Information Systems while teaching the disciplines "Technical diagnostics and reliability of computer devices", "Security and protection of computer systems", as well as in the educational process within the block of military-specialized disciplines, and were used to improve the educational and laboratory facilities of the second department of the Second Educational and Research Institute of the Yevhen Bereznyak Military Academy (Act of 18.12.2025).

In the introduction, the relevance of the research is substantiated in connection with the need to improve the efficiency, reliability, and security of RTOSs in CPS with intensive state changes. The goal, objectives, object, and subject of the research are defined, aimed at creating self-adaptive RTOSs capable of predicting failures, efficiently utilizing resources, and counteracting malicious influences. The scientific novelty is presented, the practical significance of the obtained results is highlighted, and the connection of the research topic

with scientific fields in which well-known researchers in this area work worldwide is also described.

The first chapter presents an analytical review of modern RTOS and CPS, considering their architectural features, classification, approaches to task scheduling, and fault-tolerance mechanisms. Existing methods of monitoring, self-recovery, and protection against malicious impacts are analyzed, and their limitations under conditions of intensive state changes are identified. The results of studies by domestic and foreign researchers in the field of improving the reliability and efficiency of RTOS are summarized. Based on this analysis, a problem not solved by existing approaches is formulated, and the necessity of developing new methods for RTOS synthesis capable of self-adaptation, intelligent task clustering, and proactive system protection is substantiated.

The second chapter presents the conceptual foundations for improving the RTOS architecture with a task scheduler through the integration of an external analytical module, and also defines the requirements for its efficiency, reliability, and security under conditions of intensive state changes. A structural model of interaction between RTOS components is developed, and the principles of integrating monitoring, scheduling, self-recovery, and data analysis subsystems are described. A method for dynamic allocation of tasks and resources based on tensor decomposition and the architecture of a scheduler with an external module are considered in detail; this module receives data from the RTOS, processes it using machine learning techniques, and transmits updated parameters for further self-adaptation. The possibility of both external and internal placement of the analytical module without violating system determinism is demonstrated. As a result, mechanisms of tensor analysis, clustering, and adaptive control are integrated into the structure of modern RTOSs.

The third chapter presents methods for failure prediction, preventive component restart, and detection of anomalies and falsifications in digital signals of RTOS. A Markov model for predicting system states is proposed, which makes it possible to estimate the probabilities of transitions between system states and to implement local recovery of components without a full system restart, thereby ensuring system fault tolerance. A

combined Kalman filter with an event-driven operating mode, adaptive model switching, and an anomaly detection module is developed. The method is formalized as a hybrid system with switching, and an algorithm is presented that performs prediction, innovation analysis, threshold checking, and system response in the event of detected anomalies or attacks.

The fourth chapter presents experimental studies of the proposed methods and solutions as part of a real-time operating system for CPS. The creation of a prototype based on FreeRTOS with implemented mechanisms of intelligent clustering, two-level fault tolerance, and a combined Kalman filter is described. The results of microcontroller performance tests are presented, confirming improved efficiency of resource allocation, reduced downtime, and system resilience to failures and malicious impacts. The experimental results are summarized, and a conclusion is drawn regarding the practical applicability of the developed methods for use in embedded systems and CPS.

In the conclusion, the results of the research are summarized, the achievement of the stated objective is confirmed, and the main scientific and practical results are formulated.

The appendices contain a list of scientific publications presenting the research results, acts of implementation, software listings, and tables containing the results of experiments.

Keywords: real-time operating system, cyber-physical system, intelligent clustering, tensor decomposition, fault tolerance, watchdog timer, Markov chain, combined Kalman filter, self-recovery, protection against malicious influence, sensors, IoT, monitoring.

Список публікацій здобувача за темою дисертації

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації

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>

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., Савенко О. 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>

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. Ч. 2. С. 124-132 DOI: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.5.2/18>

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>

6. Козельський О., Савенко Б. Виявлення зловмисних атак на сенсори та подробиці 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>

Праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

7. 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)

8. 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)

9. Gaj P., Sochor T., Korobchynskyi M., Savenko B., Kozelskyi O. 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>

Публікації, які додатково відображають наукові результати дисертації

10. 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>