

МЕТОД РИЗИК-ОРІЄНТОВАНОГО ПРОГНОЗНОГО КЕРУВАННЯ РЕСУРСАМИ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ НА МОБІЛЬНІЙ ПЛАТФОРМІ

¹ Харківський національний університет радіоелектроніки

Анотація

У роботі запропоновано метод ризик-орієнтованого прогнозного керування ресурсами інформаційних систем на мобільній платформі, у якому поєднано сценарне прогнозування стану, оптимізацію за ризик-орієнтованим критерієм та урахування часової структури деградації показників якості функціонування. Показано, що запропонований підхід дає змогу зменшити глибину й тривалість порушень допустимих вимог до якості та тим самим підвищити рівень забезпечення живучості інформаційних систем в умовах дії деструктивних впливів.

Ключові слова: інформаційна система, мобільна платформа, живучість, керування ресурсами, прогнозне керування, ризик-орієнтоване керування, деструктивні впливи.

Abstract

The paper proposes a risk-oriented predictive resource management method for information systems on a mobile platform, which combines scenario-based state prediction, optimization with a risk-oriented criterion, and explicit accounting for the temporal structure of quality-of-service degradation. It is shown that the proposed approach makes it possible to reduce both the depth and duration of violations of admissible quality requirements and thereby increase the level of survivability of information systems under destructive impacts.

Keywords: information system, mobile platform, survivability, resource management, predictive control, risk-oriented control, destructive impacts.

Вступ

Інформаційні системи на мобільних платформах (ІСМП) характеризуються особливостями функціонування в умовах змінного зовнішнього середовища та жорстких обмежень на обчислювальні та мережні ресурси, а також під впливом деструктивних факторів (відмов, кібератак, фізичних ушкоджень елементів платформи) [1, 2]. За таких умов задача забезпечення живучості полягає у забезпеченні того, щоб траєкторія функціонування ІСМП переважно більшість часу перебувала в області прийнятних показників якості, а відхилення від них були обмеженими за глибиною та тривалістю [3, 4].

Класичні підходи до керування ресурсами здебільшого використовують критерії, побудовані на очікуваних значеннях показників якості, і не забезпечують належного захисту від рідкісних деструктивних сценаріїв, що визначають граничні режими живучості ІСМП [5]. У подальшому використовуються два типи інформаційних пакетів: про вихід значень показників якості функціонування ІСМП за встановлені допустимі межі та про тривалість перебування ІСМП в режимах деградованого функціонування.

Прогнозне керування розглядається як інструмент, що на кожному кроці часу формує прогноз розвитку стану ІСМП та обирає керувальні дії з урахуванням очікуваних майбутніх наслідків [6]. У типовій прикладній постановці такі методи ґрунтуються на ризик-нейтральних критеріях, орієнтованих на математичне сподівання втрат, і недостатньо враховують рідкісні, але найбільш небезпечні сценарії з реалізацією значних відхилень показників якості [7].

У цьому дослідженні запропоновано метод ризик-орієнтованого прогнозного керування ресурсами ІСМП, у якому поєднано прогнозування з урахуванням ризику реалізації таких сценаріїв та явне обмеження тривалості режимів деградованого функціонування, що погіршують показники живучості ІСМП.

Метою роботи є розроблення методу ризик-орієнтованого прогнозного керування ресурсами ІСМП, який забезпечує виконання вимог до їх живучості в умовах дії деструктивних впливів та жорстких ресурсних обмежень.

Результати дослідження

Розглядається ІСМП, стан якої в дискретні моменти часу $k=0,1,2,\dots$ описується вектором $x_k \in \mathbb{R}^n$, компоненти якого відображають показники якості функціонування, суттєві для оцінювання живучості (затримки, втрати, доступність сервісів тощо). Керування ресурсами задається вектором $u_k \in U \subset \mathbb{R}^m$, що описує розподіл доступних ресурсів між підсистемами. На ІСМП діють зовнішні деструктивні впливи $w_k \in W$, що моделюють відмови, перевантаження, втрати каналів зв'язку та інші збурення. Зміна стану ІСМП задається рекурентним співвідношенням $x_{k+1} = f(x_k, u_k, w_k)$. У просторі станів виокремлюється область живучості $X = \{x_k \in \mathbb{R}^n \mid h(x) \leq 0\}$. Вектор-функція $h(x)$ задає обмеження на допустимі значення показників (максимальні затримки, мінімальна пропускну здатність, граничні втрати тощо).

Для кількісної оцінки режимів вводиться поточна функція витрат:

$$\ell(x_k, u_k) = c(u_k) + \lambda \mathbf{1}_{\{x_k \notin X\}}, \quad (1)$$

де $c(u_k)$ – функція узагальнених витрат ресурсів на кроці k ; $\lambda > 0$ – коефіцієнт штрафу за вихід за межі області живучості X ; $\mathbf{1}_{\{x_k \notin X\}}$ – індикаторна функція виходу за межі X .

На кінцевому прогнозованому інтервалі довжини N кроків формується послідовність керувальних дій $\mathbf{u}_k = (u_k, u_{k+1}, \dots, u_{k+N-1})$. З урахуванням випадкових деструктивних впливів $\mathbf{w}_k = (w_k, \dots, w_{k+N-1})$ формується випадкова величина сумарних витрат

$$L_k(\mathbf{u}_k, \mathbf{w}_k) = \sum_{t=k}^{k+N-1} \ell(x_t(\mathbf{u}_k, \mathbf{w}_k), u_t), \quad (2)$$

де траєкторія $x_t(\mathbf{u}_k, \mathbf{w}_k)$ визначається $x_{k+1} = f(x_k, u_k, w_k)$.

Для урахування рідкісних, але критичних сценаріїв використовується ризик-орієнтований функціонал $\rho_\alpha(\cdot)$ рівня $\alpha \in (0,1)$, який надає більшу вагу реалізаціям із найбільшими значеннями витрат. У якості прикладу такого функціонала розглядається умовне математичне сподівання витрат за умови, що вони перевищили α -квантиль розподілу (CVaR [5]), що має вид

$$\rho_\alpha(L_k) = \min_{\eta \in \mathbb{R}} \left\{ \eta + \frac{1}{1-\alpha} \mathbb{E}[(L_k - \eta)_+] \right\}, \quad (3)$$

де $(L_k - \eta)_+ = (z)_+ = \max\{z, 0\}$ – оператор виділення невід'ємної частини.

З урахуванням (1)–(3) прогнозна задача ризик-орієнтованого керування ресурсами на інтервалі прогнозування довжини N кроків має вигляд

$$\min_{\mathbf{u}_k} \rho_\alpha(L_k(\mathbf{u}_k, \mathbf{w}_k)) \quad (4)$$

за умов

$$x_{t+1} = f(x_t, u_t, w_t), \quad t = k, \dots, k+N-1,$$

$$u_t \in U, \quad x_t \in \Xi, \quad t = k, \dots, k+N,$$

де $\Xi \subset \mathbb{R}^n$ – множина допустимих станів з урахуванням фізичних та ресурсних обмежень (не обов'язково збігається з X).

Реалізація методу на кожному кроці k здійснюється за такою схемою.

Крок 1. Оцінювання поточного стану. Досліджується поточний стан x_k ІСМП, оновлюються

оцінки доступних ресурсів та параметрів зовнішнього середовища.

Крок 2. Формування набору типових сценаріїв деструктивних впливів. За статистичними даними або заздалегідь побудованими моделями генеруються Ψ можливих сценаріїв $\mathbf{w}_k^{(j)} = (w_k^{(j)}, \dots, w_{k+N-1}^{(j)})$, $j=1, \dots, \Psi$, які відображають різні варіанти розвитку деструктивних впливів на прогнозованому інтервалі.

Крок 3. Прогнозування траєкторій стану. Для кожного сценарію $\mathbf{w}_k^{(j)}$ і фіксованої послідовності керувальних дій $\mathbf{u}_k$ обчислюються прогнозні траєкторії $x_{t+1}^{(j)} = f(x_t^{(j)}, u_t, w_t^{(j)})$, $t=k, \dots, k+N-1$ із початковою умовою $x_k^{(j)} = x_k$.

Крок 4. Обчислення значень функції витрат за сценаріями. Для кожного сценарію за формулою (2) визначається сумарна функція витрат $L_k^{(j)}(\mathbf{u}_k) = \sum_{t=k}^{k+N-1} \ell(x_t^{(j)}, u_t)$, $j=1, \dots, \Psi$.

Крок 5. Оцінювання ризик-орієнтованого критерію. На основі множини значень $\{L_k^{(j)}(\mathbf{u}_k)\}_{j=1}^{\Psi}$ формується вибіркова оцінка ризик-орієнтованого функціонала $\rho_{\alpha}(L_k)$. Для випадку CVaR критерій обчислюється згідно з представленням (3), наприклад шляхом знаходження α -квантиля вибірки та усереднення значень, що перевищують цей квантиль.

Крок 6. Розв'язання прогновної задачі оптимізації. Відповідно до постановки (4) шукається послідовність керувальних дій $\mathbf{u}_k^*$, що мінімізує оцінку $\rho_{\alpha}(L_k)$ за умов динамічних зв'язків і ресурсних обмежень. На практиці задача розв'язується чисельними методами оптимізації з урахуванням структури функцій f , ℓ та множин U , Ξ .

Крок 7. Застосування керування та оновлення прогнозу. До реальної системи на кроці k застосовується лише перша керувальна дія $u_k = u_k^*$. Після переходу до моменту $k+1$ оцінюється новий стан, за потреби оновлюються моделі деструктивних впливів та повторно розв'язується задача (4), що забезпечує адаптацію прогнозного керування до фактичних умов функціонування ІСТМ.

Для оцінювання ефективності запропонованого методу проведено чисельний експеримент у дискретному часі. Моделювався нормований показник стану ІСТМ $s_k \in [0, 1]$, що відображає рівень виконання вимог до якості функціонування. Номінальну траєкторію s_k цього показника задано як слабко змінну послідовність значень поблизу верхньої межі інтервалу, після чого до неї додавалися випадкові збурення, а також кілька рідкісних, але суттєвих за амплітудою відхилень, що імітують деструктивні впливи. Для ризик-нейтрального методу [8] ці збурення безпосередньо відображалися на траєкторії s_k , що зумовлювало глибокі та відносно тривалі виходи показника нижче порогового рівня. У разі застосування ризик-орієнтованого прогнозного керування використовувався механізм реагування, що послаблює вплив великих відхилень за рахунок завчасного перерозподілу ресурсів. У результаті отримано іншу траєкторію s_k з меншою глибиною та тривалістю порушень порогових вимог. Результати порівняння наведені на рис. 1.

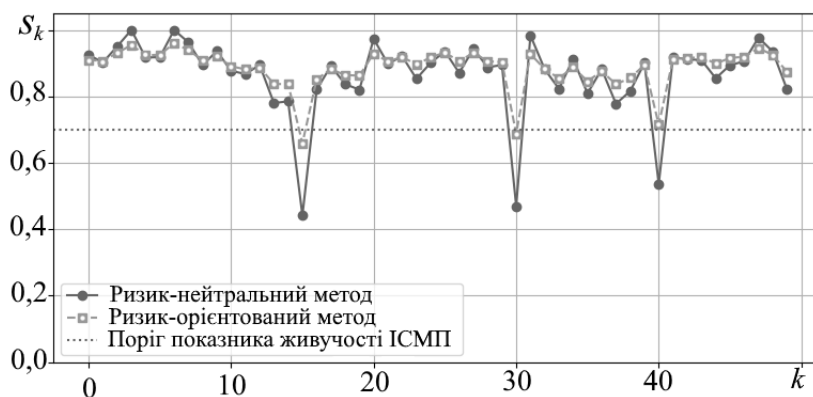


Рис. 1. Результати порівняльного експерименту

З графіку (рис. 1) видно, що для ризик-нейтрального методу керування спостерігаються глибші й більш тривалі провали показника нижче порогового рівня, тоді як у разі ризик-орієнтованого прогнозного керування такі відхилення мають меншу глибину та коротшу тривалість. Отримані результати свідчать про зростання здатності ІСТМ підтримувати допустимий рівень функційної здатності в умовах деструктивних впливів, що і демонструє рівень її живучості.

Висновки

Запропоновано метод ризик-орієнтованого прогнозного керування ресурсами ІСТМ, у якому поєднано сценарне прогнозування стану, оптимізацію за ризик-орієнтованим критерієм та обмеження тривалості перебування ІСТМ в режимах, що порушують вимоги до показників якості функціонування. Показано, що порівняно з ризик-нейтральним методом керування такий підхід дає змогу зменшити глибину й тривалість виходів показників за допустимі межі та, відповідно, підвищити рівень забезпечення живучості ІСТМ за деструктивних впливів. Одержані результати є подальшим розвитком теорії забезпечення живучості ІСТМ, оскільки уточнюють структуру цільового функціонала та механізм урахування часової структури деградації, а також формують методичне підґрунтя для побудови прикладних алгоритмів адаптивного керування ресурсами в реальних умовах експлуатації.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Reliability Models of Multi-state UAV-based Monitoring Systems: Mission Efficiency Degradation Issues / Kliushnikov I., Kharchenko V., Fesenko H., Zaitseva E., Levashenko V. // 2023 International Conference on Information and Digital Technologies (IDT), Zilina, Slovakia. – 2023. – Pp. 299-306. – DOI: <https://doi.org/10.1109/IDT59031.2023.10194443>
2. Рубан І.В. Таксономія та метрики оцінювання підходів до забезпечення живучості інформаційних систем / І.В. Рубан, В.М. Ткачов // Інформаційні технології і автоматизація – 2025. – Матеріали XVIII міжнародної науково-практичної конференції. – Одеса, 30-31 жовтня 2025 р. – Одеса, Видавництво ОНТУ. – С. 796-798.
3. Survivability Analysis of Unmanned Aerial Vehicle Network based on Dynamic Weighted Clustering Algorithm with Dual Cluster Heads / Yujing Zhang, Zhiqun Hu, Zhifei Wang, Xiangming Wen, Zhaoming Lu // Electronics. – 2023. – Vol. 12, no. 7. – № 1743. – DOI: <https://doi.org/10.3390/electronics12071743>
4. Quality-of-Service-Centric Design and Analysis of Unmanned Aerial Vehicles / Sudhanshu Kumar Jha, Shiv Prakash, Rajkumar Singh Rathore, Mufti Mahmud, Omprakash Kaiwartya, Jaime Lloret // Sensors. – 2022. – Vol. 22, no. 15. – № 5477. – DOI: <https://doi.org/10.3390/s22155477>
5. Azari A. Risk-Aware Resource Allocation for URLLC: Challenges and Strategies with Machine Learning / Amin Azari, Mustafa Ozger, Cicek Cavdar // IEEE Communications Magazine. – 2019. – Vol. 57, no. 3. – P. 42–48. – DOI: <https://doi.org/10.1109/mcom.2019.1800610>
6. Rawlings J. B. Tutorial overview of model predictive control // IEEE Control Systems Magazine. – 2000. – Vol. 20, No. 3. – P. 38–52. – DOI: <https://doi.org/10.1109/37.845037>
7. Rockafellar R. T., Uryasev S. Optimization of Conditional Value-at-Risk // Journal of Risk. – 2000. – Vol. 2, No. 3. – P. 21–41.
8. Kishida M. Risk-aware linear quadratic control using conditional value-at-risk / M. Kishida, A. Cetinkaya // IEEE Transactions on Automatic Control. – 2023. – Vol. 68, No. 1. – P. 416–423. – DOI: <https://doi.org/10.1109/TAC.2022.3142131>

Ткачов Віталій Миколайович — к.т.н., доцент, докторант кафедри електронних обчислювальних машин, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, e-mail: vitalii.tkachov@nure.ua

Науковий консультант: **Рубан Ігор Вікторович** — д.т.н., професор, професор кафедри електронних обчислювальних машин, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, e-mail: ihor.ruban@nure.ua

Tkachov Vitalii M. — Ph.D., Associate Professor, Doctoral Candidate at the Department of Electronic Computers, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, e-mail: vitalii.tkachov@nure.ua

Supervisor: **Ruban Ihor V.** — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Professor at the Department of Electronic Computers, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, e-mail: ihor.ruban@nure.ua