

МЕТОД ВІДБОРУ ПОЛІТИК ЗБЕРЕЖЕННЯ КРИТИЧНИХ ФУНКЦІЙ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ НА МОБІЛЬНИХ ПЛАТФОРМАХ ЗА КАТАСТРОФІЧНОЇ ДЕГРАДАЦІЇ КОМПОНЕНТНОЇ БАЗИ

Ткачов В.М., Рубан І.В.

Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна

Інформаційна система на мобільній платформі (ІСМП) належить до класу систем, для яких динамічна доступність ресурсу, розриви зв'язності між елементами та зовнішні деструктивні впливи є вихідними умовами функціонування. У роботах [1–3] розглянуто окремі аспекти порогового оцінювання випадкових процесів, стратегії функціонування ІСМП за дії деструктивних впливів, індексні політики забезпечення живучості ІСМП та функціональну стійкість ІСМП. У доповіді наводиться результат аналізу сценаріїв, за яких за короткий інтервал часу ІСМП втрачає 70–80 % функціональної спроможності. За таких умов визначальною стає задача швидкого відбору політики реконфігурації, за якої ІСМП підтримує критичне ядро та локальну функційну здатність уцілілих компонентів ІСМП.

Метою доповіді є розроблення методу відбору політик збереження критичних функцій ІСМП у катастрофічному режимі, за якого після зовнішнього впливу система переходить у стан глибокої структурної деградації, але має утримувати виконання основної функції на визначеному інтервалі часу.

Нехай початкова конфігурація ІСМП задається множинами вузлів N_0 каналів E_0 та сервісів Ω_0 . Після деструктивного впливу на момент t працездатними залишаються множини $N_a(t) \subseteq N_0$, $E_a(t) \subseteq E_0$, $\Omega_a(t) \subseteq \Omega_0$. Для кількісного опису масштабу втрат вводиться індекс деградації компонентів ІСМП:

$$\kappa(t) = 1 - \frac{|N_a(t)| + \rho |E_a(t)|}{|N_0| + \rho |E_0|}, \quad \rho > 0,$$

де ρ – коефіцієнт еквівалентності втрати каналу відносно втрати вузла, який відображає відносну структурну значущість порушення зв'язності при обчисленні інтегрального індексу деградації. За $\rho = 1$ втрати вузлів і каналів вважаються рівновагомими, за $\rho > 1$ переважає внесок порушення зв'язності, а за $0 < \rho < 1$ – внесок втрат вузлів.

Катастрофічному режиму відповідає область $\kappa(t) \geq 0.7$, коли політики розподілу ресурсів не забезпечують утримання цільової функції.

У такому режимі повне збереження функціональності не є реалістичною метою. Доцільним є виділення критичного ядра $\Omega^* \subset \Omega_0$ до складу якого входять сервіси виявлення події, локального підтвердження її достовірності, актуалізації стану, передавання пріоритетних керувальних повідомлень,

базового узгодження стану сервісів та перепризначення ролей між уцілілими компонентами ІСТМ. Решта сервісів розглядається як периферійні та може бути переведена у відкладений режим або згорнута для вивільнення ресурсів.

Стан критичного ядра Ω^* на момент t оцінюється за вектором безрозмірних часткових дефіцитів:

$$\vec{d}(t) = (d_c(t), d_e(t), d_b(t), d_s(t), d_q(t)), \quad d_i(t) \in [0, 1],$$

де компоненти вектора характеризують дефіцит обчислювального ресурсу $d_c(t)$, запасу ходу платформи $d_e(t)$, зв'язності $d_b(t)$, узгодженості стану сервісів $d_s(t)$ та рівня виконання критичної функції $d_q(t)$.

Агрегований дефіцит сервісного стану задається виразом:

$$d(t) = \alpha_c d_c(t) + \alpha_e d_e(t) + \alpha_b d_b(t) + \alpha_s d_s(t) + \alpha_q d_q(t),$$

$$\alpha_c + \alpha_e + \alpha_b + \alpha_s + \alpha_q = 1, \quad \alpha_i \geq 0,$$

де α_i – вагові коефіцієнти, що відображають відносну значущість відповідних часткових дефіцитів у формуванні агрегованого дефіциту сервісного стану (набувають значень відносно реальних сценаріїв).

Тоді область допустимого функціонування визначається умовою $d(t) < d^*$, де d^* – критичний кордон значення дефіциту. Подія $d(t) \geq d^*$ означає втрату здатності ІСМП діяти як цілісна система, навіть якщо окремі вузли функціонують.

На кожному кроці керування t_k формується множина допустимих політик $\Pi_\xi(t_k)$, що охоплює скорочення функцій до критичного ядра, консолідацію ролей, локальну автономізацію сегментів та мікровідновлення за умови виконання ресурсно-часових обмежень:

$$R_\pi(t_k) \leq R_\xi(t_k), \quad E_\pi(t_k) \leq E_\xi(t_k), \quad \tau_\omega(\pi) + \tau_\varpi(\pi) \leq \tau_\nu(t_k),$$

де $R_\pi(t_k)$ та $E_\pi(t_k)$ – ресурсні потреби політики π ; $R_\xi(t_k)$ та $E_\xi(t_k)$ – доступні залишкові ресурси; $\tau_\omega(\pi)$ – тривалість реконфігурації ІСМП; $\tau_\varpi(\pi)$ – час завершення узгодження стану сервісів; $\tau_\nu(t_k)$ – тривалість поточного вікна зв'язності.

Відновлення потребує виділення ресурсів та завершення узгодження стану сервісів у межах доступних вікон зв'язності.

Для катастрофічного режиму доцільно відбирати політику за ризиком досягнення критичного кордону дефіциту на найближчому інтервалі $t_k, t_k + T_k$. Для цього дієвим є механізм порогово-ймовірнісної оцінки [4]. Нехай для політики π на кроці t_k отримано оцінки математичного сподівання $m_{d,\pi}(t_k)$, дисперсії $\sigma_{d,\pi}^2(t_k)$ та дисперсії швидкості зміни дефіциту $\sigma_{d,\pi}^2(t_k)$. Тоді інтенсивність досягнення критичного кордону визначається виразом:

$$\nu_{\pi}(t_k) = \frac{\sigma_{d,\pi}^*(t_k)}{2\pi\sigma_{d,\pi}(t_k)} \exp \left\{ -\frac{[d^* - m_{d,\pi}(t_k)]^2}{2\sigma_{d,\pi}^2(t_k)} \right\}.$$

Оцінка ризику досягнення критичного кордону на інтервалі T_k задається як:

$$P_{\pi}(t_k) = 1 - \exp -\nu_{\pi}(t_k)T_k.$$

Критерій відбору політики має вигляд:

$$J(\pi, t_k) = P_{\pi}(t_k) + \lambda_1 C_{\omega}(\pi, t_k) + \lambda_2 C_{\varpi}(\pi, t_k) + \lambda_3 C_{\psi}(\pi, t_k) \rightarrow \min,$$

де $C_{\omega}(\pi, t_k)$ – ресурсні витрати на реконфігурацію ІСМП; $C_{\varpi}(\pi, t_k)$ – витрати на завершення узгодження стану сервісів; $C_{\psi}(\pi, t_k)$ – втрати функціональності периферійних сервісів; $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ – вагові коефіцієнти.

Оптимальна політика визначається згідно виразу:

$$\pi^{\dagger}(t_k) = \arg \min_{\pi \in \Pi_{\xi}(t_k)} J(\pi, t_k).$$

У катастрофічному режимі ІСМП розглядаються наступні типи політик.

Політика скорочення функцій до критичного ядра передбачає негайне виведення з множини керування всіх сервісів, що не належать до критичного ядра, з перерозподілом ресурсу на підтримання базового циклу спостереження, ухвалення рішення та передавання керувальної інформації.

Політика консолідації ролей передбачає покладання функцій координатора, оброблення та передачі даних на єдиний уцілілий елемент.

Політика локальної автономізації сегментів переводить ізольовані сегменти в режим локального керування з відкладеним міжсегментним узгодженням стану.

Політика мікровідновлення використовує короткі вікна зв'язності та залишкові резерви для повернення лише критичних компонентів інформаційної системи на мобільній платформі.

Таким чином, метод включає такі етапи:

формування профілю уцілілої конфігурації та оцінювання індексу деградації;

виділення критичного ядра і розподіл периферійних сервісів за режимами згортання, відкладення або мінімального підтримання;

оцінювання параметрів процесу дефіциту для кожної потенційної політики та обчислення ризику;

вибір політики з множини $\Pi_{\xi}(t_k)$ (запуск реконфігурації та диспетчеризації виконання дій);

оновлення оцінок стану і повторення циклу керування.

У сценарії, де інформаційна система на мобільній платформі виконує функції мобільного спостереження, локального аналізу та координації дій у зоні надзвичайної події, комбінований зовнішній вплив, наприклад, призводить до

втрати більшості сенсорних вузлів, двох основних маршрутів передавання даних, частини накопичувачів та значної частки обчислювальних модулів. За такого стану підтримання повного набору сервісів формує надмірний дефіцит сервісного стану.

За цих умов метод відбирає політику скорочення функцій до критичного ядра або локальної автономізації сегментів залежно від оціненого ризику та умов здійсненності. У результаті інформаційна система на мобільній платформі зберігає інформацію про стан, пріоритетні потоки подій, локальне ухвалення рішень у сегментах та подієву передачу критичних повідомлень, що дає змогу утримати $d(t) < d^*$ на інтервалі, достатньому для подальшого етапного відновлення. За таких умов живучість ІСМП визначається здатністю організувати залишковий ресурс у мінімально достатню функціональну конфігурацію, не допустити досягнення критичного кордону дефіциту та зберегти умови для подальшого відновлення (за можливості).

Висновки. Розроблено метод відбору політик збереження критичних функцій ІСМП за катастрофічної деградації компонентної бази, який ґрунтується на порогово-ймовірнісному оцінюванні ризику досягнення критичного кордону дефіциту сервісного стану на скінченному інтервалі функціонування ІСМП.

Метод враховує масштаб втрат вузлів і каналів, ресурсно-часові обмеження реконфігурації, вікна зв'язності зі змінною тривалістю та пропускну здатністю, а також витрати на завершення узгодження стану сервісів. Запропонований підхід, згідно з модельними експериментами, забезпечує обґрунтований вибір політики збереження критичного ядра системи після втрати 70–80 % компонентної бази з множини політик скорочення функцій до критичного ядра, консолідації ролей, локальної автономізації сегментів та ймовірного мікровідновлення.

Список літератури

1. Terenyk D., Kharchenko V. Choosing strategies for deployment and ensuring the reliability of a UAV swarm to support communications in destruction conditions. *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*. 2024. No. 3 (29). P. 91–103. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2024.3.091>
2. Catastrophic cascade of failures in interdependent networks / S. V. Buldyrev et al. *Nature*. 2010. Vol. 464, no. 7291. P. 1025–1028. DOI: <https://doi.org/10.1038/nature08932>
3. Dodonov O. G., Gorbachyk O. S., Kuznietsova M. G. Automated Organizational Management Systems of Critical Infrastructure: Security and Functional Stability. *CEUR Workshop Proceedings*. 2022. Vol. 3241. P. 1–12. URL: <https://ceur-ws.org/Vol-3241/paper1.pdf>
4. Ruban I. V., Tkachov V. M. A method for synthesizing index policies to ensure the survivability of a mobile platform-based information system. *Applied Aspects of Information Technology*. 2025. Vol. 8, no. 4. P. 424–441. DOI: <https://doi.org/10.15276/aaait.08.2025.27>
5. Kuchuk N., Tkachov V. Self-healing Systems Modelling. *Advances in Self-healing Systems Monitoring and Data Processing*. Cham, 2022. P. 57–111. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-96546-4_2