

УДК 004.412.2.056:004.77

Рубан І. В., Ткачов В. М.

## КОНТРАКТНЕ КЕРУВАННЯ ВИКОНАННЯМ ВІДНОВЛЕННЯ КРИТИЧНИХ СЕРВІСІВ ІНФОРМАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ НА МОБІЛЬНІЙ ПЛАТФОРМІ

**Огляд предметної області.** Для інформаційних систем на мобільних платформах (ІСМП), що забезпечують підготовку та діяльність сил безпеки і оборони, визначальними є режими функціонування за переривчастої зв'язності, обмеженості обчислювального ресурсу, динамічної інтенсивності інформаційного обміну [1]. У таких системах живучість слід розглядати як властивість зберігати або відновлювати виконання критичних функцій у реальному часі за ресурсної недостатності, часткової втрати зв'язності та поточних порушень стану даних, процесів і ресурсів [2]. Для прикладних інформаційних систем сектору безпеки і оборони це означає здатність підтримувати мінімально допустимий рівень функціональності, маневрування, зміни конфігурації мережі, пошкодження окремих вузлів та деградації каналів зв'язку [3].

Результати досліджень у даній предметній області містять багаторівневий опис ІСМП [4], що поєднує рівні даних, процесів і ресурсів, формалізацію критеріїв живучості, причинно-часові інваріанти. Відома модель міжрівневих порушень і політик відновлення [4], у якій взаємодія рівнів задається через контракти типу припущення–гарантія, а коректність політики пов'язується з безпекою інваріантів, локалізацією наслідків. У працях [4]–[5], присвячених оперативному параметричному керуванню, розглянуто динамічне резервування через резервні профілі, прогнозно-адаптивний перерозподіл ресурсу з диспетчеризацією критичних процесів та сервісно-орієнтоване відновлення критичних сервісів за керованої деградації. Відновлення потребує виділення ресурсів та завершення узгодження стану сервісів у межах доступних вікон зв'язності.

Однак, основна увага зосереджена на виборі допустимого кроку відновлення, оцінюванні його початкової ресурсної здійсненності або на виборі керувальної дії в оперативному такті. Для реальних ІСМП цього недостатньо. Під час виконання вже обраного кроку можуть змінюватися доступний ресурс, пропускна здатність каналу, активність міжрівневих залежностей, обсяг потрібного узгодження стану та допустима межа деградації допоміжних сервісів. За таких умов допустимий крок здатний втратити коректність до завершення виконання. Це призводить до незавершених переходів, накопичення ресурсних дефіцитів, повторного дефіциту виконання порогових вимог до QoS та подовження інтервалів зниженої живучості ІСМП. Отже, окремого розгляду потребує задача керування саме виконанням відновлення. У роботі контракт відновлення визначається як формалізований опис допустимого виконання кроку відновлення, який задає передумови його ініціювання, гарантований результат, незмінні умови на проміжних етапах реалізації та критерій завершеності в межах доступного вікна зв'язності.

**Постановка задачі.** Нехай у момент часу  $t$  ІСМП описується вектором поточних вимірюваних показників

$$x(t) = \langle x_D(t), x_P(t), x_R(t), x_S(t) \rangle, \quad (1)$$

де  $x_D(t)$  – вектор показників даних;  $x_P(t)$  – вектор показників процесного виконання;  $x_R(t)$  – вектор показників ресурсного забезпечення;  $x_S(t)$  – вектор показників якості функціонування критичних сервісів.

Нехай  $C(t)$  – множина активних міжрівневих контрактів, а  $A(t)$  – множина потенційних кроків відновлення для сервісів, що мають дефіцит виконання порогових вимог до QoS.

Для кроку  $a \in A(t)$  вводяться: прогнозована тривалість виконання  $\delta_a$ , потрібний ресурс  $r_a(\tau)$ , обсяг узгодження стану  $s_a(\tau)$ , приріст рівня сервісу  $\Delta q_a$ , залишок контракту  $\rho_e(\tau)$  для кожного активного контракту  $e \in C(t)$ . Також для кроку відновлення мають виконуватися незмінні умови на всьому інтервалі його реалізації. Тоді множина допустимих кроків визначається як:

$$\Psi(t) = \left\{ a \in A_t \mid \forall \tau \in [t, t + \delta_a]: \begin{array}{l} I_D(x_D(\tau)) \geq 0, \\ I_P(x_P(\tau)) \geq 0, \\ I_R(x_R(\tau)) \geq 0, \\ \rho_e(\tau) \geq 0, \forall e \in C(t), \\ s_a(\tau) \leq \Xi(\tau), \\ r_a(\tau) \leq \Upsilon(\tau) \end{array} \right\}, \quad (2)$$

де  $I_D, I_P, I_R$  – функції інваріантів рівнів даних, процесів і ресурсів відповідно;  $\Xi(\tau)$  – залишок доступного вікна зв'язності;  $\Upsilon(\tau)$  – доступний ресурс у момент  $\tau$ .

Перша група умов забезпечує збереження коректності стану, друга – контрактну сумісність, третя – завершуваність відновлення в межах поточного вікна зв'язності зі змінною тривалістю та пропускну здатністю. Задача полягає у формуванні такого правила керування виконанням кроку відновлення, яке максимізує внесок дії в живучість ІСМП та водночас не допускає порушення незмінних умов під час виконання.

**Основна частина.** Запропонований підхід ґрунтується на трактуванні кроку відновлення як контрактно-обмеженого процесу. Для кожного кроку задаються передумови, гарантії, незмінні умови та ознака завершуваності. Передумови визначають початкову допустимість кроку за ресурсом, зв'язністю та поточним станом сервісу. Гарантії відображають очікуване зменшення дефіциту сервісу та завершення узгодження стану. Незмінні умови задають межі, які не можуть бути порушені на жодному проміжному етапі виконання.

Отже, на початку оперативного інтервалу формується множина потенційних кроків для критичних сервісів, що мають дефіцит. Для кожного кроку виконується попередня перевірка приналежності до множини  $\Psi(t)$ . Після запуску крок подається послідовністю проміжних станів. Після кожного переходу повторно обчислюються інваріанти, залишки контрактів, оцінка доступного ресурсу та можливість завершити узгодження стану в межах поточного вікна. Якщо умови зберігаються, крок продовжується. У разі порушення хоча б однієї умови виконується одна з трьох керувальних дій: призупинення кроку, відкладення завершення до наступного вікна або перебудова кроку зі зменшенням його обсягу чи з вивільненням ресурсу за рахунок допустимої периферійної деградації.

Вибір дії доцільно здійснювати за критерієм максимізації приросту живучості з урахуванням ресурсного бюджету реконфігурації та ризику накопичення дефіциту:

$$a^*(t) = \arg \max_{a \in \Psi(t)} (w_1 \Delta V(a, t) + w_2 \Delta Q(a, t) - w_3 \Theta(a, t) - w_4 B(a, t)), \quad (3)$$

де  $\Delta V(a, t)$  – приріст показника живучості на оперативному інтервалі;  $\Delta Q(a, t)$  – зменшення дефіциту критичних сервісів;  $\Theta(a, t)$  – обсяг ресурсного бюджету реконфігурації;  $B(a, t)$  – очікуване зростання дефіциту;  $w_i$  – вагові коефіцієнти.

Якщо  $\Psi(t) = \emptyset$ , то виконується режим утримання безпечного стану з перенесенням відновлення на наступне допустиме вікно або з перебудовою сервісного профілю.

Запропонована постановка (1)–(3) відрізняється від відомих підходів тим, що

умовою коректності є збереження контрактної сумісності та інваріантних властивостей на всій траєкторії виконання. За рахунок цього усувається клас керувальних дій, які формально є допустимими в момент запуску, але фактично породжують незавершені переходи і погіршують показник живучості ІСМП. У підходах, що оперують сервісно-орієнтованим відновленням, резервуванням та прогнозно-адаптивним перерозподілом ресурсу, такі дії не виділялися як окремий об'єкт керування, оскільки основною дією залишалася початкова здійсненість або допустимість розподілу ресурсів оперативному такті.

**Висновки.** Запропоновано підхід до контрактного керування виконанням відновлення критичних сервісів ІСМП, у якому крок відновлення контролюється протягом усього інтервалу реалізації за ознаками збереження інваріантів, недопущення від'ємного залишку контракту, наявності ресурсу та завершуваності узгодження стану сервісів у межах поточного вікна зв'язності. Формалізація через множину контрактно-допустимих кроків і критерій максимізації приросту живучості дозволяє перейти від перевірки початкової допустимості до керування безпечним просуванням відновлення.

Практична застосовність підходу пов'язана з інформаційними системами груп БпЛА, мобільних пунктів керування, робототехнічних платформ, рухомих вузлів та кордонних обчислювальних вузлів. Для таких систем характерні короткі оперативні інтервали, змінний ресурс і періодична зв'язність, тому саме проміжна втрата коректності відновлення є одним із джерел зниження живучості ІСМП. Використання контрактного керування виконанням дає підстави очікувати зменшення частки незавершених відновлювальних переходів, скорочення тривалості деградованих режимів та підвищення частки інтервалів, у межах яких критичні функції залишаються працездатними.

Подальший напрям роботи лежить у площині дослідження ефективності від застосування підходу у реальних ІСМП.

#### Список використаних джерел

1. Рубан І. В., Ткачов В. М., Заліван О. В. Проблематика забезпечення живучості інформаційних систем на мобільних платформах в умовах розвитку оборонних технологій / *XIV Наукова конференція "Наукові підсумки 2025 року". Збірка наукових тез.* – Харків, Х.: ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ЦЕНТР, 2025 – 88 с. e-ISBN 978-617-8360-24-5.
2. Abakumov A., Kharchenko V., Popov P. A Hybrid Cybersecurity Assessment Framework for Unmanned Aircraft Vehicles Based on IMECA and Penetration Testing. *2025 55th Annual IEEE/IFIP International Conference on Dependable Systems and Networks Workshops (DSN-W)*, Naples, Italy, 23–26 June 2025. 2025. P. 7–14. DOI: <https://doi.org/10.1109/dsn-w65791.2025.00032>.
3. Сучасний підхід до розрахунків можливостей і спроможностей виконання завдань військовими підрозділами з використанням штучного інтелекту / А. В. Бойченко та ін. *Реєстрація, зберігання і обробка даних.* 2025. Т. 27, № 2. С. 111–121. DOI: <https://doi.org/10.35681/1560-9189.2025.27.2.345668>.
4. Технологія забезпечення живучості територіально-розподілених інформаційних комп'ютерних систем в єдиному інформаційному просторі / О. Г. Додонов та ін. *Реєстрація, зберігання і обробка даних.* 2024. Т. 26, № 1. С. 121–143. DOI: <https://doi.org/10.35681/1560-9189.2024.26.1.308659>.
5. Tkachov V., Ruban I. Development of a predictive adaptive resource reallocation method with critical process dispatching in information systems on mobile platforms. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies.* 2026. Vol. 1, no. 3 (139). P. 6–23. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2026.350796>.