

В. М. ТКАЧОВ

кандидат технічних наук, доцент,
докторант кафедри електронних обчислювальних машин
Харківський національний університет радіоелектроніки
ORCID: 0000-0002-6524-9937

МЕТОД ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЖИВУЧОСТІ ІНФОРМАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ НА МОБІЛЬНІЙ ПЛАТФОРМІ З УРАХУВАННЯМ ЗДІЙСНЕННОСТІ РЕЗЕРВНИХ ПРОФІЛІВ РЕСУРСОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

У статті розглянуто одну із модифікацій задачі забезпечення живучості інформаційної системи на мобільній платформі за умов обмежених ресурсів, нестационарних зовнішніх впливів та переривчастості зв'язності компонентів системи. Показано, що за таких умов критичним є здійсненість поточного режиму ресурсозабезпечення та наявність формалізованого ресурсного запасу до межі здійсненності, що дає змогу своєчасно виявляти наближення стану системи до зриву виконання її критичних функцій. Запропоновано метод оперативного динамічного резервування, що використовує скінченний набір резервних профілів ресурсозабезпечення та правило керованого перемикання між ними. Для кожного профілю на кроці керування формується план розподілу ресурсів для критичних процесів, після чого обчислюється запас до межі здійсненності як мінімальний відносний резерв за умовами виконання мінімальних ресурсних вимог і наявності доступних ресурсів платформи. Рішення про утримання або перемикання профілю приймається з урахуванням зони утримання, обчислювальних витрат на перехід, граничної частоти перемикань у ковзному вікні та обмеження на перемикання лише у вікнах зв'язності. Проведено імітаційне дослідження на нестационарних часових рядах завантаженості процесорного ядра, навантаження каналу передачі даних та енергетичного ресурсу автономного ходу платформи за наявності критичних втрат ресурсів, часткових відновлень стану системи і епізодів переривчастості зв'язності її компонентів. Результати дослідження засвідчили, що запропонований метод підвищує живучість системи за інтегральними індикаторами ресурсного запасу та ресурсного дефіциту, збільшує час до першого порушення умов здійсненності резервних профілів ресурсозабезпечення та забезпечує виконання реконфігурацій в кроках доступної зв'язності без істотного збільшення кількості перемикань профілів.

Ключові слова: інформаційна система, мобільна платформа, живучість, профіль ресурсозабезпечення, критичний процес.

V. M. TKACHOV

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Doctoral Student at the Department of Electronic Computers
Kharkiv National University of Radio Electronics
ORCID: 0000-0002-6524-9937

METHOD FOR ENSURING THE SURVIVABILITY OF AN INFORMATION SYSTEM ON A MOBILE PLATFORM TAKING INTO ACCOUNT THE FEASIBILITY OF REDUNDANT RESOURCE-PROVISIONING PROFILES

The paper considers a modification of the problem of ensuring the survivability of an information system on a mobile platform under limited resources, nonstationary external impacts, and intermittent connectivity among system components. It is shown that, under these conditions, the feasibility of the current resource-provisioning mode and the availability of a formalized resource margin to the feasibility boundary are critical, as they enable timely detection of the system state approaching a failure to perform its critical functions. A method of real-time dynamic redundancy is proposed that employs a finite set of redundant resource-provisioning profiles and a rule for controlled switching between them. For each profile, a resource allocation plan for critical processes is formed within a control interval; thereafter, the margin to the feasibility boundary is computed as the minimum relative reserve subject to meeting minimum resource requirements and the availability of the platform's resources. The decision to retain or switch a profile is made with account for a holding zone, computational switching costs, a limit on the switching rate within a sliding window, and the constraint that switching is allowed only within connectivity windows. A simulation study is carried out using nonstationary time series of processor-core utilization, data-link load, and the energy resource for the platform's autonomous operation, under critical resource losses, partial recovery of the system state, and episodes of intermittent connectivity among



its components. The results demonstrate that the proposed method improves system survivability according to integral indicators of resource margin and resource deficit, increases the time to the first violation of feasibility conditions for redundant resource-provisioning profiles, and ensures that reconfigurations are performed within intervals of available connectivity without a significant increase in the number of profile switches.

Key words: *information system, mobile platform, survivability, resource-provisioning profile, critical process.*

Постановка проблеми

Інформаційні системи на мобільних платформах (ІСМП) функціонують за умов жорстких ресурсних обмежень [1], нестаціонарних деструктивних впливів [2] і переривчастої зв'язності [3, 4]. За таких умов ключовою інтегральною властивістю ІСМП стає живучість [5-10]. Це означає потребу підтримувати критичні процеси в межах мінімально гарантованого ресурсозабезпечення при одночасній зміні доступної обчислювальної потужності, пам'яті, енергетичного запасу мобільної платформи і каналних можливостей передачі даних [11-15].

Типова ситуація для ІСМП полягає в поступовій деградації стану платформи під дією зовнішніх впливів, коли на окремих кроках керування стають неможливими або надмірно ресурсозатратними реконфігурації, а ресурсне забезпечення критичних процесів переходить у зону ризику зриву основної функції ІСМП. Крім цього існує чинник переривчастої зв'язності, що полягає в тому, що моменти, коли допускаються узгоджені перемикання режимів функціонування ІСМП і повна оцінка стану ІСМП, не збігаються в часі з моментами пікової деградації. Через це рішення про перехід на резервні профілі ресурсозабезпечення критичних процесів часто запізнюються або виконуються з надмірною частотою, провокуючи коливальні режими перерозподілу ресурсів [16].

Нав'язні підходи оперативного керування обчислювальними ресурсами [17-21] забезпечують часткові рішення резервування та стабілізації стану ІСМП у процесі її реконфігурації. Водночас у задачах забезпечення живучості ІСМП залишається невирішена задача, пов'язана з відсутністю формалізованого урахування меж можливостей резервних профілів ресурсозабезпечення. На практиці резервні профілі мають обмежену область здійсненності, яка звужується при погіршенні ресурсного забезпечення мобільної платформи та при обмеженні частоти реконфігурацій у вікнах недоступності [22]. За відсутності механізму оцінювання ресурсного запасу до межі здійсненності профілю ІСМП не формується надійний критерій своєчасного перемикання між профілями, унаслідок чого зменшується частка кроків керування, в яких критичні процеси отримують мінімально гарантоване ресурсне забезпечення.

Отже, актуальною є задача розроблення методу забезпечення живучості ІСМП за переривчастої зв'язності, який використовує множину резервних профілів ресурсозабезпечення, формалізує їх здійсненність на кожному кроці керування ІСМП та забезпечує керований перехід між профілями на основі оцінки запасу до межі здійсненності з обмеженням інтенсивності реконфігурацій. Це створює основу для підвищення стабільності функціонування ІСМП шляхом зменшення кількості випадків відмови критичним функціям у ресурсному забезпеченні.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Проблематика живучості інформаційних систем, які працюють за переривчастої зв'язності та ресурсних обмежень, найчастіше розглядається у контексті мережної стійкості та надійності забезпечуючої інфраструктури.

У роботі [23] запропоновано рамку оцінювання стійкості та живучості обчислювальних мереж; введено поняття толерантності до розривів мережних зв'язків, через відсутність стабільних маршрутів передачі даних, непередбачуваними затримками унаслідок мобільності вузлів мережі та енергетичними обмеженнями цих вузлів. У роботі [23] наведено опис процесу деградації сервісу під дією зовнішніх чинників, однак автори зосереджують фокус тільки на мережному рівні та не формалізують оперативне керування ресурсами для критичних процесів інформаційної системи через дискретні режими ресурсозабезпечення.

У роботі [24] систематизовано поняття стійкості в екосистемі мобільних крайових обчислень. Зокрема, показано, що цілі стійкості охоплюють доступність, надійність, безпеку та приватність, а засоби досягнення поділяються на випереджальні та реактивні з неминучими компромісами обчислювальних затрат та затримок при виконанні основної функції. Такий огляд добре окреслює пул вимог і типів заходів, але не дає прикладної процедури вибору резервних режимів на основі оцінювання здійсненності ресурсозабезпечення для конкретної критичної функції інформаційної системи в реальному часі.

У роботі [25] наведено огляд відомих стратегій балансування обчислювальних задач у мобільних крайових обчисленнях. В роботі основний фокус зосереджено на застосуванні критеріїв затримки, показників якості обслуговування та політик енерговитрат технічних систем, на яких розгортаються інформаційні системи. У роботі [25] наведено узагальнення класів рішень і наборів показників, проте вони орієнтовані на середньоінтервальні метрики. Це не дозволяє систематизувати режимні профілі ресурсозабезпечення з обмеженими областями здійсненності, що є критично важливим для живучості інформаційної системи під час пікових епізодів зовнішнього впливу.

Аналіз огляду [26] дає можливість дослідити підходи, які стосуються впровадження заходів із розвантаження інформаційних систем за типами задач під час деструктивного впливу на них. Розглянуті рішення фокусуються

на ролі залежності або незалежності задач у прийнятті рішень інформаційною системою щодо перерозподілу обчислювальних ресурсів. Однак у більшості розглянутих підходів пріоритетом залишаються показники продуктивності інформаційної системи, а не підтримання мінімально гарантованого ресурсозабезпечення критичних процесів як вимоги до забезпечення живучості інформаційної системи.

У роботі [27] досліджено механізм коригування обчислювальних задач за наявності переривань виконання на крайових вузлах інформаційної системи. Запропоновано імовірнісну модель переривань, у якій імовірність переривання визначається сумарним навантаженням. Запропоноване рішення формується в логіці вибору вузла для підтримки критичного процесу, що може спричинити часті перепризначення вузлів та додаткові накладні витрати на міграцію стану процесу в умовах нестационарного навантаження інформаційної системи.

Таким чином, аналіз робіт [23-27] показує, що залишається недостатньо формалізованою прикладна задача забезпечення живучості ІСМП за переривчастою зв'язності через керований перехід між резервними профілями ресурсозабезпечення з явним урахуванням здійсненності кожного профілю на коротких кроках керування ІСМП та з обмеженням інтенсивності реконфігурацій, щоб уникати коливальних режимів.

Формулювання мети дослідження

Метою дослідження є розробка методу забезпечення живучості інформаційної системи на мобільній платформі за переривчастою зв'язності, який ґрунтується на використанні множини резервних профілів ресурсозабезпечення та керованому перемиканні між ними з урахуванням здійсненності кожного профілю.

Для досягнення мети необхідно:

- визначити формальну модель резервних профілів ресурсозабезпечення критичних процесів та задати умови здійсненності профілю з урахуванням ресурсних обмежень платформи, мінімально припустимих вимог критичних процесів і обмежень реконфігурацій за переривчастою зв'язності ІСМП;

- формалізувати показник ресурсного запасу до межі здійсненності профілю як оперативний індикатор наближення до втрати можливості підтримувати критичні функції визначеним профілем;

- розробити правило керованого перемикання профілів, яке забезпечує збереження критичних функцій за наявності деградації ресурсів і водночас обмежує інтенсивність реконфігурацій у ковзному вікні для запобігання коливальним режимам ІСМП;

- сформулювати метрики оцінювання ефективності методу та виконати експериментальне дослідження, що підтверджує підвищення частки кроків керування, у яких виконуються мінімальні вимоги критичних процесів, за типових сценаріїв деградації ІСМП або, власне, платформи.

Викладення основного матеріалу дослідження

Модель дискретного керування та переривчастої зв'язності

Розглядається клас ІСМП, що реалізує множини процесів, серед яких виділяється підмножина критичних процесів C [28]. Критичними вважаються процеси, для яких у дискретні моменти прийняття рішень з періодом дискретизації Δt повинні виконуватися мінімальні оперативні вимоги, необхідні для підтримання основної функції ІСМП. Надалі один цикл прийняття рішень називається кроком керування.

Час дискретизується рівномірними кроками керування з періодом дискретизації Δt , індексованими $k = 0, 1, 2, \dots$. Індекс k позначає номер кроку керування, а фізичний час t належить інтервалу $t \in [k\Delta t, (k+1)\Delta t]$. На k -му кроці доступний вектор ресурсів мобільної платформи

$$\vec{r}_k = (r_k^{(1)}, \dots, r_k^{(q)}), \quad (1)$$

де компоненти відповідають групам ресурсів платформи. У (1) значення \vec{r}_k є нестационарними, залежать від зовнішніх впливів і внутрішнього навантаження, а також можуть змінюватися стрибкоподібно.

Переривчата зв'язність вводиться як бінарна ознака доступності каналів керування та синхронізації:

$$a_k \in \{0, 1\}. \quad (2)$$

В (2): $a_k = 1$ означає наявність зв'язності на k -му кроці, що дає змогу виконувати повний цикл оцінювання стану, узгодження та реконфігурації; $a_k = 0$ означає інтервал недоступності, на якому можливості отримання телеметрії та виконання узгоджених реконфігурацій істотно обмежені.

На практиці a_k визначає кроки, на яких допускається кероване перемикання режимів ресурсозабезпечення, та кроки, на яких ІСМП є живучою переважно за рахунок раніше сформованих рішень.

Для кожного критичного процесу $i \in C$ задається вектор мінімально допустимого ресурсозабезпечення:

$$\vec{m}_i = (m_i^{(1)}, \dots, m_i^{(q)}), \quad (3)$$

який визначає мінімальні рівні ресурсів, достатні для виконання критичної функції в деградованому, але допустимому режимі. Надалі з (3) \vec{m}_i використовується як базова оперативна вимога забезпечення живучості на кожному кроці керування ІСМП.

Отже, на кожному кроці керування необхідно сформувавши розподіл ресурсів між критичними процесами, який є допустимим щодо поточного вектора доступних ресурсів \vec{r}_k , задовольняє мінімальні вимоги \vec{m}_i та враховує режим зв'язності a_k , що визначає можливість виконання реконфігурацій і керованого перемикавання між резервними профілями ресурсозабезпечення.

Резервні профілі ресурсозабезпечення критичних процесів

Для оперативного забезпечення живучості за умов нестаціонарності доступних ресурсів і переривчастої зв'язності метод використовує скінченну множину резервних профілів ресурсозабезпечення

$$\Xi = \{P^{(1)}, P^{(2)}, \dots, P^{(\ell)}\}. \tag{4}$$

Кожен профіль $P^{(\ell)}$ інтерпретується як наперед визначений режим розподілу ресурсів між критичними процесами множини C , призначений для певного класу деградаційних впливів або ресурсних обмежень, зокрема для зниження доступного енергетичного ресурсу, звуження пропускної здатності каналів, обмеження обчислювальної потужності, а також для їх комбінованих проявів.

Профіль $P^{(\ell)}$ визначається парою складових:

- правило формування розподілу ресурсів між критичними процесами на кожному кроці керування;
- множина допустимих параметрів профілю, що задає обмеження на область його застосування.

Спочатку доцільно сформулювати правило формування розподілу ресурсів. Нехай на k -му кроці керування профіль $P^{(\ell)}$ формує для кожного критичного процесу $i \in C$ вектор виділених ресурсів

$$\vec{x}_{i,k}^{(\ell)} = \pi_i^{(\ell)}(\vec{s}_k, \vec{\theta}_\ell), \tag{5}$$

де \vec{s}_k – вектор спостережуваного стану ІСМП; $\vec{\theta}_\ell$ – параметри профілю.

Функції $\pi_i^{(\ell)}(\cdot)$ визначаються реалізацією та можуть варіюватися від простих пропорційних правил до табличних залежностей або малопараметричних регуляторів [29]. Вимога до обчислювальної складності є суттєвою, оскільки оцінювання профілів виконується на кожному кроці керування.

Розподіл (5) розглядається як план ресурсозабезпечення критичних процесів на k -му кроці. Надалі саме для цього плану перевіряються умови здійсненності профілю.

Множина допустимих параметрів профілю $P^{(\ell)}$ формується наступним чином. Нехай параметри $\vec{\theta}_\ell$ профілю $P^{(\ell)}$ належать множині допустимих значень $\vec{\theta}_\ell \in \Theta_\ell$. Тоді Θ_ℓ задає область застосовності профілю та визначає межі його можливостей. До Θ_ℓ можуть входити:

- допустимі межі квот і вагових коефіцієнтів пріоритетів критичних процесів;
- допустимі пороги деградації показників якості сервісів некритичних процесів;
- допустимі обмеження на частку ресурсу, яку дозволено перерозподіляти на користь критичних процесів;
- допустимі режими жорстких і м'яких обмежень, що відрізняються допустимим рівнем деградації другорядних сервісів.

З точки зору практичної застосовності Θ_ℓ є механізмом формалізації меж застосовності профілю.

Множина профілів (4) формується так, щоб:

- профілі покривали типові режими деградації ресурсів платформи та мережної доступності;
- між профілями існували змістовні відмінності з акцентом на окремі групи ресурсів або категорії критичних процесів;
- кількість профілів була обмеженою, що забезпечує можливість у реальному часі виконувати перевірку здійсненності кожного профілю та обирати актуальний профіль.

Таким чином, резервні профілі ресурсозабезпечення задаються як дискретний набір режимів, для кожного з яких визначено правило розподілу ресурсів між критичними процесами та область допустимих параметрів. Це дає змогу надалі оцінювати здійсненність профілю на кожному кроці керування та реалізовувати кероване перемикавання між профілями з дотриманням обмежень на обчислювальну складність у реальному часі.

Здійсненність резервних профілів ресурсозабезпечення

Особливістю запропонованого підходу є те, що резервний профіль розглядається як режим з формалізованими межами застосовності, які визначаються поточним станом ресурсів, мінімальними вимогами критичних процесів і можливістю виконання реконфігурацій за переривчастої зв'язності. Для цього вводиться формалізована умова здійсненності профілю на кожному кроці керування.

Ресурсна здійсненність формалізується наступним чином. Нехай профіль $P^{(\ell)}$ на k -му кроці керування формує розподіл ресурсів $\vec{x}_{i,k}^{(\ell)}$ для всіх $i \in C$. Перша умова здійсненності полягає в тому, що сумарно виділені ресурси не перевищують доступні ресурси платформи:

$$\sum_{i \in C} \vec{x}_{i,k}^{(\ell)} \leq \vec{r}_k, \tag{6}$$

де нерівність є покомпонентною. Умова (6) відсікає профілі, що потребують ресурсів, які відсутні на поточному кроці керування.

Друга умова здійсненності відображає оперативне трактування живучості на кожному кроці керування: кожен критичний процес повинен отримувати не менше мінімально допустимого ресурсозабезпечення:

$$\bar{x}_{i,k}^{(\ell)} \geq \bar{m}_i, \quad i \in C, \quad (7)$$

де нерівність є покомпонентною. Якщо для деякого процесу i умова (7) порушується хоча б за одним компонентом, то профіль $P^{(\ell)}$ вважається нездійсненим незалежно від виконання інших умов.

Третя умова враховує, що на кроках недоступності зв'язності реконфігурація або кероване перемикання профілів є забороненими або істотно обмеженими. Нехай $\ell_k \in \{1, \dots, K\}$ – індекс профілю, застосованого на k -му кроці керування. Факт перемикання профілю задається індикатором

$$\chi_k = I\{\ell_k \neq \ell_{k-1}\} \in \{0, 1\}. \quad (8)$$

Тоді перемикання з урахуванням (8) є допустимим лише за наявності зв'язності:

$$\chi_k \leq a_k. \quad (9)$$

Зокрема, за $a_k = 0$ кероване перемикання профілю на k -му кроці заборонене (9), отже ІСМП зберігає попередньо обраний профіль.

Для обмеження коливальних режимів і надмірної інтенсивності реконфігурацій додатково може вводитися обмеження на кількість перемикань у ковзному вікні [30] тривалістю W кроків:

$$\sum_{\tau=k-W+1}^k \chi_\tau \leq L, \quad (10)$$

де L – допустима кількість перемикань у вікні.

Обмеження (10) забезпечує стабілізацію процесу оперативного керування шляхом стримування частих реконфігурацій.

Таким чином, профіль $P^{(\ell)}$ вважається здійсненим на k -му кроці керування, якщо для його параметрів $\bar{\theta}_\ell \in \Theta_\ell$ одночасно виконуються умови ресурсної здійсненності, виконання мінімальних вимог критичних процесів і допустимості реконфігурації з урахуванням значення a_k та обмеження на кількість перемикань у ковзному вікні.

Зазначена умова реалізується як процедура, що може бути перевірена. Для кожного профілю $P^{(\ell)}$ формується план ресурсозабезпечення $\bar{x}_{i,k}^{(\ell)}$, після чого перевіряються наведені нерівності. У результаті визначається множина здійснених профілів на k -му кроці керування, яка надалі використовується для введення ресурсного запасу до межі здійсненності та правила керованого перемикання профілів.

Ресурсний запас до межі здійсненності

Для вирішення задачі завчасного виявлення наближення до межі здійсненності поточного профілю вводиться запас до межі здійсненності. Він використовується як оперативний індикатор для керованого перемикання між резервними профілями ресурсозабезпечення.

Спочатку формулюється поняття ресурсного запасу до межі здійсненності профілю. Тут пропонується ввести дві складові:

1. Запас щодо мінімальних вимог критичних процесів:

$$\delta_k^{(\ell, \text{crit})} = \min_{i \in C} \min_{j \in \{1, \dots, q\}} \frac{x_{i,k}^{(\ell, j)} - m_i^{(j)}}{\max(m_i^{(j)}, \varepsilon)}, \quad (11)$$

де $j \in \{1, \dots, q\}$ – індекс групи ресурсу відповідно до вектору (1).

Показник (11) є найгіршим відносним запасом за всіма критичними процесами та групами ресурсів і характеризує наближення плану до межі порушення мінімально допустимого ресурсозабезпечення.

2. Запас щодо ресурсних обмежень платформи:

$$\delta_k^{(\ell, \text{res})} = \min_{j \in \{1, \dots, q\}} \frac{r_k^{(j)} - \sum_{i \in C} x_{i,k}^{(\ell, j)}}{\max(r_k^{(j)}, \varepsilon)}. \quad (12)$$

Показник $\delta_k^{(\ell, \text{res})}$ характеризує відносний запас за сумарним використанням кожної групи ресурсів щодо доступного ресурсу платформи.

У (11), (12) ε – стабілізатор, що забезпечує коректність нормування та виключає ділення на нуль у випадках $m_i^{(j)} = 0$, $r_k^{(j)}$.

Загальний запас профілю визначається як:

$$\delta_k^{(\ell)} = \min(\delta_k^{(\ell, \text{crit})}, \delta_k^{(\ell, \text{res})}). \quad (13)$$

Інтерпретація (13):

- $\delta_k^{(\ell)} \geq 0$ означає здійсненність профілю на k -му кроці керування;
- $\delta_k^{(\ell)} \approx 0$ означає наближення до межі здійсненності;
- $\delta_k^{(\ell)} < 0$ означає втрату здійсненності та фіксує порушення оперативних вимог живучості.

Таким чином, $\delta_k^{(\ell)}$ узгоджує обмеження мінімальних вимог критичних процесів і ресурсні обмеження платформи та задає єдиний скалярний індикатор для оперативного керування.

На k -му кроці керування формується множина здійснених профілів:

$$K_k = \{\ell \in \{1, \dots, K\} : \delta_k^{(\ell)} \geq 0\}. \quad (14)$$

Ця множина може змінюватися в часі внаслідок деградації доступних ресурсів \vec{r}_k , зміни спостережуваного стану \vec{s}_k та зміни доступності зв'язності a_k .

Правило керованого перемикання профілів

Нехай ℓ_{k-1} – профіль, застосований на попередньому кроці. Рішення щодо профілю ℓ_k на кроці k приймається за таким правилом:

1. Утримання профілю здійснюється, якщо попередній профіль є здійсненим і має достатній запас:

$$\ell_{k-1} \in K_k, \quad \delta_k^{(\ell_{k-1})} \geq \delta_\varphi \quad \Rightarrow \quad \ell_k = \ell_{k-1}. \quad (15)$$

Параметр $\delta_\varphi > 0$ задає зону стійкого утримання та зменшує кількість дрібних перемикань за наявності похибок вимірювань і малих флуктуацій стану ІСМП.

2. Умова необхідності перемикання: якщо

$$\ell_{k-1} \notin K_k \quad \text{або} \quad \delta_k^{(\ell_{k-1})} < \delta_\varphi, \quad (16)$$

то виникає потреба перейти на інший профіль.

3. Перемикання допускається лише за наявності зв'язності та за умови невичерпання ліміту перемикань у ковзному вікні:

$$a_k = 1, \quad \sum_{\tau=k-W+1}^{k-1} \chi_\tau \leq L-1. \quad (17)$$

Якщо ці умови не виконуються, то $\ell_k = \ell_{k-1}$ і ІСМП продовжує працювати в поточному профілі до настання кроку з доступною зв'язністю та доступним резервом за лімітом перемикань.

4. За допустимого перемикання обирається профіль, що максимізує запас до межі здійсненності з урахуванням витрат перемикання:

$$\ell_k = \arg \max_{\ell \in K_k} (w_\delta \delta_k^{(\ell)} - \lambda c(\ell_{k-1}, \ell)), \quad (18)$$

де $w_\delta > 0$ і $\lambda \geq 0$ – вагові параметри, що вводяться для скаляризації двох конкуруючих критеріїв вибору профілю: максимізації запасу до межі здійсненності $\delta_k^{(\ell)}$ та мінімізації витрат реконфігурації під час переходу між профілями. Параметр w_δ визначає масштаб внеску показника запасу в узагальнену цільову функцію, а λ задає жорсткість урахування витрат перемикання.

На практиці w_δ може приймати одиничне значення за умови нормованості $\delta_k^{(\ell)}$, а λ обирається як параметр політики керування для забезпечення заданого компромісу між підтриманням живучості ІСМП та допустимою інтенсивністю реконфігурацій за наявності додаткового обмеження на кількість перемикань у ковзному вікні.

Функція $c(\ell_{k-1}, \ell) \geq 0$ моделює витрати переходу між профілями та відображає інерційність реконфігурацій, зумовлену ресурсними накладними витратами. У найпростішому випадку $c(\ell_{k-1}, \ell)$ задається матрицею штрафів $C \in \mathbb{R}_+^{K \times K}$, елемент $C_{p,q}$ якої визначає відносну ціну переходу з профілю p на профіль q , причому $C_{p,p} = 0$. Значення штрафів можуть встановлюватися за результатами вимірювань затримки реконфігурації, додаткових енерговитрат мобільної платформи і обсягу синхронізації стану або, за відсутності таких даних, на основі структурної відмінності профілів, наприклад через норму різниці параметрів $\vec{\theta}_p - \vec{\theta}_q$ або різниці планів розподілу ресурсів. Таке подання забезпечує врахування ресурсних затрат перемикань під час вибору профілю без ускладнення основної процедури керування.

У підсумку правило має дві ключові властивості:

- рішення приймається на основі формалізованого запасу до межі здійсненності профілю;

– перемикання обмежуються доступністю зв'язності та лімітом інтенсивності реконфігурацій у ковзному вікні, що знижує ймовірність коливальних режимів в оперативному керуванні.

Описане правило (15-18) реалізується тактовим алгоритмом:

Крок 1. На k -му кроці керування необхідно зібрати значення показників $\bar{s}_k, \bar{r}_k, a_k$.

Крок 2. Для всіх профілів $\ell = 1, \dots, K$ необхідно сформуванати план ресурсозабезпечення $\bar{x}_{i,k}^{(\ell)}$ для всіх $i \in C$ та обчислити запас $\delta_k^{(\ell)}$.

Крок 3. Необхідно сформуванати множину здійснених профілів (14).

Крок 4. Необхідно застосувати правило утримання або керованого перемикання для визначення активного профілю ℓ_k з урахуванням a_k та обмежень на кількість перемикачів у ковзному вікні.

Крок 5. Необхідно реалізувати розподіл ресурсів відповідно до обраного профілю ℓ_k .

Запропонований алгоритм не потребує розв'язання обчислювально складних оптимізаційних задач на кожному кроці керування, що забезпечує придатність до реалізації в режимі реального часу на мобільній платформі.

Експериментальне дослідження розробленого методу

Експериментальне дослідження виконано на імітаційній моделі ІСМП [31]. У моделі розглянуто три групи ресурсів: обчислювальний ресурс (процесор) $r_k^{(1)}$, пропускну здатність каналу зв'язку $r_k^{(2)}$ та енергетичний ресурс мобільної платформи $r_k^{(3)}$. Доступні ресурси задаються у нормованому вигляді та формуються як нестационарні часові ряди з інерційністю, випадковими коливаннями, піковими втратами продуктивності та частковими відновленнями за рахунок наявних резервів мобільної платформи.

У моделі задано три критичні процеси з мінімальними ресурсними вимогами, що повільно змінюються в часі та відображають зміну інтенсивності основної функції ІСМП. Для наближення до реальних умов додатково враховано конкуренцію з боку некритичного навантаження, неповноту спостереження ресурсного стану, серії розривів зв'язності каналів керування та синхронізації, а також накладні витрати на реконфігурацію, які тимчасово зменшують доступні ресурси під час переходу між профілями.

Переривчаста зв'язність задається бінарною ознакою доступності (2), що визначає можливість виконання керованих реконфігурацій на кроці керування. Кероване перемикання профілів дозволяється лише за наявності зв'язності ІСМП, а інтенсивність перемикачів обмежується в ковзному часовому вікні.

Порівняння виконано для трьох режимів керування:

– запропонований метод з вибором резервного профілю за критерієм здійсненності та запасу до межі здійсненності;

– статичний режим із фіксованим профілем ресурсозабезпечення;

– пороговий режим перемикання профілів без перевірки здійсненності профілю.

У межах експерименту аналізуються: сценарій зміни доступних ресурсів і переривчастої зв'язності, динаміка ресурсного запасу до межі здійсненності для порівнюваних режимів, а також траєкторія керованого перемикання резервних профілів у запропонованому методі.

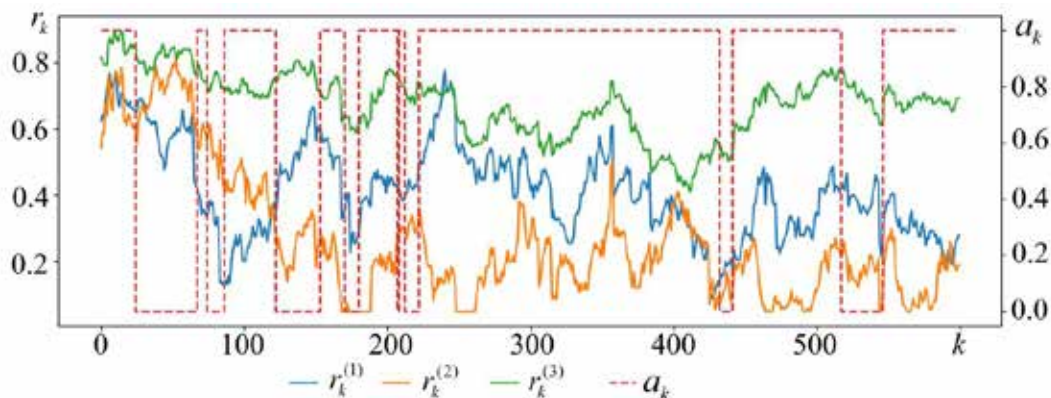


Рис. 1. Нестационарний сценарій доступних ресурсів платформи та переривчастої зв'язності каналів керування і синхронізації

На рис. 1 наведено сценарій доступних ресурсів для критичних процесів та бінарну ознаку доступності зв'язності (2). З рис. 1 видно, що $r_k^{(2)}$ є найбільш дефіцитним ресурсом і характеризується глибокими просіданнями до низьких рівнів. $r_k^{(1)}$ також демонструє істотні коливання, тоді як $r_k^{(3)}$ у середньому зберігається на вищому рівні, але має довготривалі тенденції погіршення [31].

Переривчаста зв'язність проявляється у вигляді серій інтервалів недоступності, в межах яких керовані реконфігурації профілю є забороненими. За цих умов ІСМП змушена функціонувати на основі раніше сформованих рішень, що підвищує вимоги до правильного вибору профілю до настання інтервалів недоступності зв'язності.

Заданий сценарій є принципово складнішим за монотонну деградацію, оскільки поєднує дефіцит окремих ресурсів, стохастичні критичні стани та часові інтервали недоступності зв'язності. Саме за таких умов найбільш виразно проявляється практична відмінність між профільною адаптацією із перевіркою здійсненності, статичним профілем та пороговими правилами перемикавання.

Ключовою величиною оцінювання є ресурсний запас до межі здійсненності δ_k . Невід'ємне значення δ_k відповідає здійсненності профілю, від'ємне значення відповідає дефіциту та порушенню умов здійсненності.

Для порівняння режимів використано такі показники:

- Ψ_1 – частка кроків керування, на яких виконується здійсненність;
- Ψ_2 – середнє значення запасу до межі здійсненності;
- Ψ_3 – середній дефіцит, що агрегує глибину порушень здійсненності;
- Ψ_4 – кількість перемикань профілів;
- Ψ_5 – узгодженість перемикань зі зв'язністю, що відображає виконання обмеження на зміну профілю лише за $a_k = 1$.

Зазначений набір метрик дає змогу оцінювати якість підтримання живучості і дисципліну реконфігурацій за умов переривчастої зв'язності.

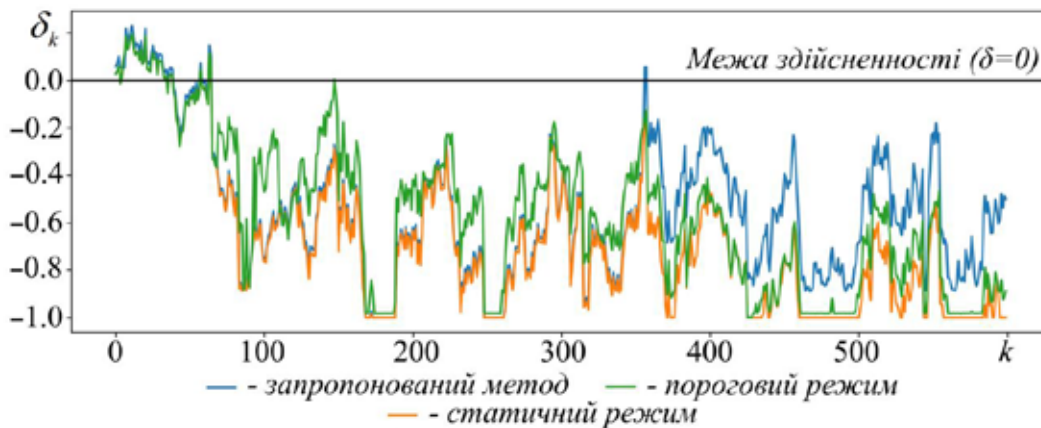


Рис. 2. Динаміка запасу до межі здійсненності δ_k для різних режимів

Динаміку ресурсного запасу до межі здійсненності для трьох режимів наведено на рис. 2. На початковій ділянці моделювання запропонований метод зберігає додатний запас суттєво довше: перше порушення здійсненності настає при $k = 35$, тоді як для статичного та порогового режимів перше порушення фіксується вже при $k = 3$. Це означає, що профільна адаптація з перевіркою здійсненності та зоною утримання дає змогу майже у 12 разів відтермінувати перший зрив виконання мінімальних вимог у розглянутому сценарії.

На подальших ділянках, коли $r_k^{(1)}$ та $r_k^{(2)}$ періодично переходять у дефіцитну область, усі режими демонструють від'ємні значення δ_k , однак запропонований метод утримує траєкторію ближче до межі здійсненності. Це підтверджується інтегральними показниками:

- середній запас $\Psi_2 = -0.545$ для запропонованого методу проти $\Psi_2 = -0.673$ для статичного режиму;
- середній дефіцит $\Psi_3 = 0.553$ для запропонованого методу проти $\Psi_3 = 0.679$ для статичного режиму.

Пороговий режим демонструє проміжний результат: $\Psi_2 = -0.565$ та $\Psi_3 = 0.570$.

Отже, пороговий режим покращує показники відносно статичного профілю, однак поступається запропонованому методу за сукупністю інтегральних оцінок.

Додатково важливим є показник частки кроків керування, на яких виконується здійсненність: $\Psi_1 = 0.075$ для запропонованого методу проти $\Psi_1 = 0.0667$ для статичного режиму та $\Psi_1 = 0.0683$ для порогового режиму. За жорсткого сценарію це зростання є помірним, однак воно узгоджується з формою кривої на рис. 2, де запропонований метод частіше повертає ІСМП в область, близьку до межі здійсненності, під час часткових відновлень доступності ресурсів.

На рис. 3 наведено траєкторію індексу обраного резервного профілю в запропонованому методі. З рис. 3 видно, що метод виконує лише три перемикання протягом усього інтервалу моделювання, тобто $\Psi_4 = 3$. Для порівняння, пороговий режим виконує $\Psi_4 = 16$ перемикань [31], що підсилює накладні витрати на реконфігурацію та погіршує запас до межі здійсненності на частині інтервалів, не забезпечуючи відтермінування першого порушення здійсненності.

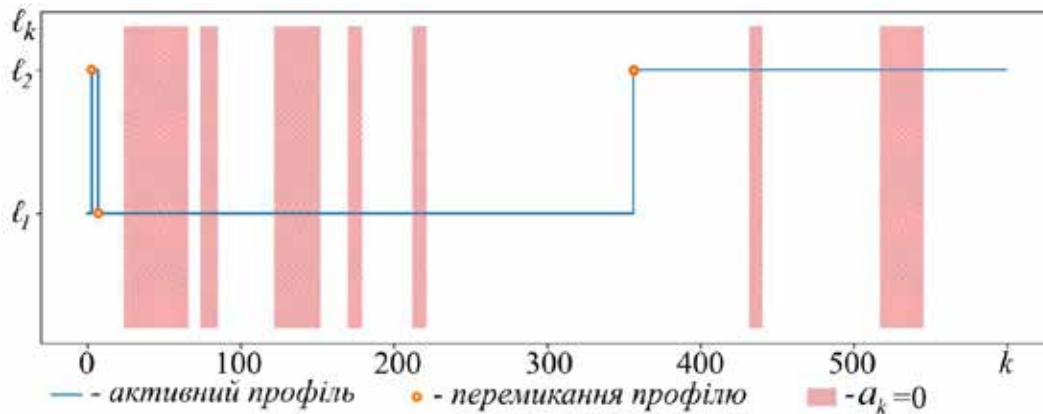


Рис. 3. Траєкторія вибору активного резервного профілю в запропонованому методі:
 l_1 – профіль енергозбереження; l_2 – профіль підтримання живучості

Затінені ділянки на рис. 3 відповідають $a_k = 0$, тобто інтервалам недоступності зв'язності. На цих ділянках перемикання профілів не відбувається, що підтверджує виконання обмеження на реконфігурацію за переривчастої зв'язності. Для запропонованого та порогового режимів показник $\Psi_s = 1.0$, тобто всі фактичні перемикання виконані лише за наявності зв'язності. Для статичного режиму цей показник не є змістовно визначальним, оскільки перемикання відсутні.

Рис. 3 демонструє характерну для запропонованого підходу траєкторію: тривале утримання профілю в зоні прийнятної запасу та перемикання лише тоді, коли оцінений запас виходить із зони утримання і водночас існує здійснений альтернативний профіль. Поєднання перевірки здійсненності, зони утримання, урахування витрат переходу та обмежень за зв'язністю ІСМП забезпечує низьку інтенсивність перемикань без втрати керованості запасом за ресурсними обмеженнями.

Експериментальна перевірка на нестационарному сценарії ресурсів із переривчастою зв'язністю підтвердила ефективність запропонованого методу. Порівняно зі статичним профілем і пороговим перемиканням метод забезпечує кращі інтегральні показники запасу до межі здійсненності та дефіциту, а також суттєво збільшує час до першого порушення здійсненності.

Результати, наведені на рис. 1–3, показують, що досягнутий ефект не супроводжується надмірною реконфігурацією: кількість перемикань залишається малою, а всі фактичні перемикання узгоджені з інтервалами доступної зв'язності. Це підтверджує прикладну доцільність використання формалізованого запасу до межі здійсненності як оперативного індикатора для керованого перемикання резервних профілів ресурсозабезпечення в умовах нестационарності ресурсів і переривчастої зв'язності компонентів ІСМП.

Висновки

Розроблено метод забезпечення живучості інформаційної системи на мобільній платформі за умов нестационарності ресурсів і переривчастої зв'язності, який базується на виборі резервного профілю ресурсозабезпечення зі скінченної множини профілів за умовою здійсненності на кроці керування.

Набула подальшого розвитку теорія оперативного керування живучістю ІСМП, зокрема шляхом введення формалізованого показника запасу до межі здійсненності профілю та правила керованого перемикання резервних профілів, яке поєднує перевірку здійсненності, зону утримання профілю, урахування витрат переходу, допустимість перемикань лише за наявності зв'язності та обмеження інтенсивності перемикань у ковзному вікні. На відміну від існуючих підходів, які фіксують переважно факт здійсненності або застосовують порогові правила без формалізованої оцінки наближення до втрати здійсненності, запропонований метод забезпечує завчасне виявлення критичного зменшення запасу, своєчасний вибір здійсненої альтернативи та зниження коливальності реконфігурацій за переривчастої зв'язності.

Експериментально на нестационарному сценарії ресурсів з інтервалами недоступності зв'язності підтверджено перевагу запропонованого методу над статичним профілем і пороговим перемиканням за сукупністю показників. Для запропонованого методу одержано збільшення часу до першого порушення здійсненності до 35 кроків проти 3 кроків у базових режимах, зменшення середнього дефіциту до 0.553 порівняно з 0.679 для статичного режиму і 0.570 для порогового режиму, а також зменшення кількості перемикань до 3 проти 16 у пороговому режимі за повної узгодженості перемикань із вікнами доступної зв'язності.

Практична значущість результатів полягає у придатності методу до реалізації в режимі реального часу на мобільних платформах з обмеженими обчислювальними ресурсами, оскільки процедура керування зводиться до перевірки здійсненності скінченної множини профілів і вибору профілю за простою скалярною оцінкою, що поєднує ресурсний запас до межі здійсненності та витрати на зміну профілю.

Список використаної літератури

1. Рубан І.В., Ткачов В.М. Багаторівнева модель інформаційної системи на мобільній платформі та формалізація критеріїв її живучості. *Вісник Херсонського національного технічного університету*. 2025. Том 2 № 3(94). С. 399–409. DOI: <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.3.2.51>.
2. Рубан І. В., Ткачов В. М. Моделювання процесу керування інформаційною системою на мобільній платформі в умовах деградації рівня даних. *Актуальні питання сучасної інформатики: матеріали доповідей X Всеукраїнської науково-практичної конференції з міжнародною участю «Сучасні інформаційні технології в освіті та науці»*, 13–14 листопада 2025 р. / за заг. ред. А. Федорчук. Житомир : Вид-во ЖДУ, 2025. Вип. 13. С. 446–450.
3. Додонов О. Г., Кузнєцова М. Г., Горбачик О. С. Моделювання і оцінювання функціональної стійкості інформаційних систем. *Реєстрація, зберігання і обробка даних*. 2025. Т. 27, № 1. С. 76–88. DOI: <https://doi.org/10.35681/1560-9189.2025.27.1.335752>.
4. Routing protocols strategies for flying Ad-Hoc network (FANET): Review, taxonomy, and open research issues / M. J. Almansor et al. *Alexandria Engineering Journal*. 2024. Vol. 109. P. 553–577. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aej.2024.09.032>.
5. AlHidaifi S. M., Asghar M. R., Ansari I. S. A Survey on Cyber Resilience: Key Strategies, Research Challenges, and Future Directions. *ACM Computing Surveys*. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1145/3649218>.
6. Flying Sensor and Edge Network-Based Advanced Air Mobility Systems: Reliability Analysis and Applications for Urban Monitoring / H. Fesenko et al. *Drones*. 2023. Vol. 7, no. 7. P. 409. DOI: <https://doi.org/10.3390/drones7070409>.
7. Ланде Д.В. Методи підвищення живучості інформаційної складової корпоративних інформаційно-аналітичних систем. *Реєстрація, зберігання і обробка даних*. 2012. Т. 14, № 2. С. 48–58. DOI: <https://doi.org/10.35681/1560-9189.2012.14.2.105050>.
8. Додонов О. Г., Ланде Д. В. Мережева модель структурної живучості. *Реєстрація, зберігання і обробка даних*. 2021. Т. 23, № 1. С. 15–22. DOI: <https://doi.org/10.35681/1560-9189.2021.23.1.235075>.
9. 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>.
10. Models for Assessing the Dependability of Programmable Devices with Controlled Multi-Level Degradation / V. Kharchenko et al. *Lecture Notes in Networks and Systems*. Cham, 2025. P. 85–95. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-92734-8_9.
11. Рубан І.В., Ткачов В.М. Таксономія та метрики оцінювання підходів до забезпечення живучості інформаційних систем. *Інформаційні технології і автоматизація – 2025: матеріали XVIII міжнародної науково-практичної конференції*, 30-31 жовтня 2025 р. – Одеса: видавництво ОНТУ, 2025 р. С. 796–798.
12. Фролов Д. Є. Огляд підходів до класифікації відмов і чинників впливу на функціональну здатність багаторівневих інформаційних систем. *Проблеми інформатизації: тези доп. тринадцятої міжнар. наук.-техн. конф.*, 27–28 листопада 2025 р. Т. 3, секція 4. Баку–Харків–Бельсько-Бяла, 2025. С. 21–23.
13. Resource Scheduling in Edge Computing: A Survey / Q. Luo et al. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2021. P. 1. DOI: <https://doi.org/10.1109/comst.2021.3106401>.
14. Xia X., Fattah S. M. M., Babar M. A. A Survey on UAV-enabled Edge Computing: Resource Management Perspective. *ACM Computing Surveys*. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1145/3626566>.
15. Real-Time Service Migration in Edge Networks: A Survey / Y. Zhang et al. *Journal of Sensor and Actuator Networks*. 2025. Vol. 14, no. 4. P. 79. DOI: <https://doi.org/10.3390/jsan14040079>.
16. Handover Decision with Multi-Access Edge Computing in 6G Networks: A Survey / S. Jahandar et al. *Results in Engineering*. 2025. P. 103934. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.103934>.
17. Singh R., Sukapuram R., Chakraborty S. A survey of mobility-aware Multi-access Edge Computing: Challenges, use cases and future directions. *Ad Hoc Networks*. 2022. P. 103044. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2022.103044>.
18. Mukhopadhyay A., Iosifidis G., Ruffini M. Migration-aware Network Services with Edge Computing. *IEEE Transactions on Network and Service Management*. 2022. P. 1. DOI: <https://doi.org/10.1109/tnsm.2021.3139857>.
19. Wan X. Dynamic Resource Management in MEC Powered by Edge Intelligence for Smart City Internet of Things. *Journal of Grid Computing*. 2024. Vol. 22, no. 1. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10723-024-09749-3>.
20. AI Services-Oriented Dynamic Computing Resource Scheduling Algorithm Based on Distributed Data Parallelism in Edge Computing Network of Smart Grid / J. Zou et al. *Future Internet*. 2024. Vol. 16, no. 9. P. 312. DOI: <https://doi.org/10.3390/fi16090312>.
21. Ismail A. A., Khalifa N. E., El-Khoribi R. A. A survey on resource scheduling approaches in multi-access edge computing environment: a deep reinforcement learning study. *Cluster Computing*. 2025. Vol. 28, no. 3. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10586-024-04893-7>.
22. Dynamic IoT deployment reconfiguration: A global-level self-organisation approach / N. Farabegoli et al. *Internet of Things*. 2024. Vol. 28. P. 101412. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.iot.2024.101412>.

23. Evaluation of network resilience, survivability, and disruption tolerance: analysis, topology generation, simulation, and experimentation / J. P. G. Sterbenz et al. *Telecommunication Systems*. 2011. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11235-011-9573-6>.
24. Resilience in Edge Computing: Challenges and Concepts / D. Ergenç et al. *Foundations and Trends® in Networking*. 2025. Vol. 14, no. 4. P. 254–340. DOI: <https://doi.org/10.1561/13000000074>.
25. Task offloading strategies for mobile edge computing: A survey / S. Dong et al. *Computer Networks*. 2024. P. 110791. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2024.110791>.
26. A survey on task type-based computation offloading in mobile edge networks / H. Wu et al. *Ad Hoc Networks*. 2025. P. 103754. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2025.103754>.
27. Bui K. A., Yoo M. Interruption-Aware Computation Offloading in the Industrial Internet of Things. *Sensors*. 2025. Vol. 25, no. 9. P. 2904. DOI: <https://doi.org/10.3390/s25092904>.
28. Tkachov V., Ruban I. Integral survivability metric of an information system on a mobile platform under functional cascading and secondary failures. *Innovative Technologies And Scientific Solutions For Industries*. 2025. No. 4(34). P. 78–100. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2025.4.078>.
29. Higham N. J. *Accuracy and Stability of Numerical Algorithms*. 2nd ed. Philadelphia, PA: Society for Industrial and Applied Mathematics (SIAM), 2002. 680 p. DOI: <https://doi.org/10.1137/1.9780898718027>.
30. Hespanha J. P., Morse A. S. Stability of switched systems with average dwell-time. 1999 *Conference on Decision and Control*, Phoenix, AZ, USA. DOI: <https://doi.org/10.1109/cdc.1999.831330>.
31. Tkachov V. Supplementary figures and tables for the article Method for Ensuring the Survivability of an Information System on a Mobile Platform with Account for the Feasibility of Redundant Resource-Provisioning Profiles. Версія 1 [Data set]. *Zenodo*. 2026. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.18724603>.

References

1. Ruban, I. V., & Tkachov, V. M. (2025). Multi-level model of an information system on a mobile platform and formalization of its survivability criteria. *Bulletin of Kherson National Technical University*, 2(3(94)), 399-409. <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.3.2.51>
2. Ruban, I. V., & Tkachov, V. M. (2025). Modeling the control process of an information system on a mobile platform under data-level degradation conditions. In A. Fedorchuk (Ed.), *Current issues of modern informatics: Proceedings of the 10th All-Ukrainian scientific and practical conference with international participation on modern information technologies in education and science* (Issue 13, pp. 446-450). ZhDU Publishing House.
3. Dodonov, O. H., Kuznietsova, M. H., & Horbachyk, O. S. (2025). Modeling and evaluation of the functional survivability of information systems. *Registration, Storage and Processing of Data*, 27(1), 76-88. <https://doi.org/10.35681/1560-9189.2025.27.1.335752>
4. Almansor, M. J., Md Din, N., Baharuddin, M. Z., Ma, M., Alsayednoor, H. M., Al-Shareeda, M. A., & Al-Asadi, A. J. (2024). Routing protocols strategies for flying ad-hoc network (FANET): Review, taxonomy, and open research issues. *Alexandria Engineering Journal*, 109, 553-577. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2024.09.032>
5. AlHidaifi, S. M., Asghar, M. R., & Ansari, I. S. (2024). A survey on cyber resilience: Key strategies, research challenges, and future directions. *ACM Computing Surveys*, 56(8), Article 196, 1-48. <https://doi.org/10.1145/3649218>
6. Fesenko, H., Illiashenko, O., Kharchenko, V., Kliushnikov, I., Morozova, O., Sachenko, A., & Skorobohatko, S. (2023). Flying sensor and edge network-based advanced air mobility systems: Reliability analysis and applications for urban monitoring. *Drones*, 7(7), Article 409. <https://doi.org/10.3390/drones7070409>
7. Lande, D. V. (2012). Methods for increasing the survivability of the information component of corporate information-analytical systems. *Registration, Storage and Processing of Data*, 14(2), 48-58. <https://doi.org/10.35681/1560-9189.2012.14.2.105050>
8. Dodonov, O. H., & Lande, D. V. (2021). Network model of structural survivability. *Registration, Storage and Processing of Data*, 23(1), 15-22. <https://doi.org/10.35681/1560-9189.2021.23.1.235075>
9. Dodonov, O. H., Putiatin, V. H., Dodonov, V. O., Kutsenko, S. A., Hermaniuk, A. P., Izvarin, I. V., & Kravchuk, K. O. (2024). Technology for ensuring the survivability of territorially distributed information computer systems in a unified information space. *Registration, Storage and Processing of Data*, 26(1), 121-143. <https://doi.org/10.35681/1560-9189.2024.26.1.308659>
10. Kharchenko, V., Ponochovnyi, Y., Vdovichenko, O., & Mahmudov, K. (2025). Models for assessing the dependability of programmable devices with controlled multi-level degradation. In W. Zamojski, J. Mazurkiewicz, J. Sugier, T. Walkowiak, & J. Kacprzyk (Eds.), *Advances in Dependable Systems and Networks* (Lecture Notes in Networks and Systems, Vol. 1427, pp. 85-95). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-92734-8_9
11. Ruban, I. V., & Tkachov, V. M. (2025). Taxonomy and metrics for evaluating approaches to ensuring the survivability of information systems. In *Information technologies and automation – 2025: Proceedings of the 18th international scientific and practical conference* (pp. 796-798). ONTU Publishing House.

12. Frolov, D. Ye. (2025). Review of approaches to the classification of failures and factors influencing the functional capability of multi-level information systems. In *Problems of informatization: Abstracts of the 13th international scientific and technical conference* (Vol. 3, Section 4, pp. 21-23).
13. Luo, Q., Hu, S., Li, C., Li, G., & Shi, W. (2021). Resource Scheduling in Edge Computing: A Survey. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 1. <https://doi.org/10.1109/comst.2021.3106401>.
14. Xia, X., Fattah, S. M. M., & Babar, M. A. (2023). A survey on UAV-enabled edge computing: Resource management perspective. *ACM Computing Surveys*. <https://doi.org/10.1145/3626566>
15. Zhang, Y., Zhao, K., Yang, Y., & Zhou, Z. (2025). Real-Time Service Migration in Edge Networks: A Survey. *Journal of Sensor and Actuator Networks*, 14(4), 79. <https://doi.org/10.3390/jsan14040079>.
16. Jahandar, S., Shayea, I., Gures, E., El-Saleh, A. A., Ergen, M., & Alnakhli, M. (2025). Handover Decision with Multi-Access Edge Computing in 6G Networks: A Survey. *Results in Engineering*, 103934. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.103934>.
17. Singh, R., Sukapuram, R., & Chakraborty, S. (2022). A survey of mobility-aware multi-access edge computing: Challenges, use cases and future directions. *Ad Hoc Networks*, Article 103044. <https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2022.103044>.
18. Mukhopadhyay, A., Iosifidis, G., & Ruffini, M. (2022). Migration-aware network services with edge computing. *IEEE Transactions on Network and Service Management*. <https://doi.org/10.1109/TNSM.2021.3139857>.
19. Wan, X. (2024). Dynamic resource management in MEC powered by edge intelligence for smart city Internet of Things. *Journal of Grid Computing*, 22(1). <https://doi.org/10.1007/s10723-024-09749-3>.
20. Zou, J., Xin, P., Wang, C., Zhang, H., Wei, L., & Wang, Y. (2024). AI Services-Oriented Dynamic Computing Resource Scheduling Algorithm Based on Distributed Data Parallelism in Edge Computing Network of Smart Grid. *Future Internet*, 16(9), 312. <https://doi.org/10.3390/fi16090312>.
21. Ismail, A. A., Khalifa, N. E., & El-Khoribi, R. A. (2025). A survey on resource scheduling approaches in multi-access edge computing environment: a deep reinforcement learning study. *Cluster Computing*, 28(3). <https://doi.org/10.1007/s10586-024-04893-7>.
22. Farabegoli, N., Pianini, D., Casadei, R., & Viroli, M. (2024). Dynamic IoT deployment reconfiguration: A global-level self-organisation approach. *Internet of Things*, 28, 101412. <https://doi.org/10.1016/j.iot.2024.101412>.
23. Sterbenz, J. P. G., Çetinkaya, E. K., Hameed, M. A., Jabbar, A., Qian, S., & Rohrer, J. P. (2011). Evaluation of network resilience, survivability, and disruption tolerance: analysis, topology generation, simulation, and experimentation. *Telecommunication Systems*. <https://doi.org/10.1007/s11235-011-9573-6>.
24. Ergenç, D., Memedi, A., Fischer, M., & Dressler, F. (2025). Resilience in Edge Computing: Challenges and Concepts. *Foundations and Trends® in Networking*, 14(4), 254–340. <https://doi.org/10.1561/13000000074>.
25. Dong, S., Tang, J., Abbas, K., Hou, R., Kamruzzaman, J., Rutkowski, L., & Buyya, R. (2024). Task offloading strategies for mobile edge computing: A survey. *Computer Networks*, 110791. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2024.110791>.
26. Wu, H., Lu, Y., Ma, H., Xing, L., Deng, K., & Lu, X. (2025). A survey on task type-based computation offloading in mobile edge networks. *Ad Hoc Networks*, 103754. <https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2025.103754>.
27. Bui, K. A., & Yoo, M. (2025). Interruption-Aware Computation Offloading in the Industrial Internet of Things. *Sensors*, 25(9), 2904. <https://doi.org/10.3390/s25092904>.
28. Tkachov, V., & Ruban, I. (2025). Integral survivability metric of an information system on a mobile platform under functional cascading and secondary failures. *Innovative Technologies And Scientific Solutions For Industries*, (4(34)), 78–100. <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2025.4.078>
29. Higham, N. J. (2002). *Accuracy and stability of numerical algorithms* (2nd ed.). Society for Industrial and Applied Mathematics (SIAM). <https://doi.org/10.1137/1.9780898718027>.
30. Hespanha, J. P., & Morse, A. S. (1999). Stability of switched systems with average dwell-time. In *Conference on Decision and Control*. IEEE. <https://doi.org/10.1109/cdc.1999.831330>.
31. Tkachov V. (2026) Supplementary figures and tables for the article Method for Ensuring the Survivability of an Information System on a Mobile Platform with Account for the Feasibility of Redundant Resource-Provisioning Profiles. Version 1 [Data set]. *Zenodo*. 2026. <https://doi.org/10.5281/zenodo.18724603>.

Дата першого надходження статті до видання: 10.02.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 16.03.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 07.05.2026