

**Ткачов В.М.**

<https://orcid.org/0000-0002-6524-9937>

Харківський національний університет радіоелектроніки

**Рубан І.В.**

<https://orcid.org/0000-0002-4738-3286>

Харківський національний університет радіоелектроніки

## РОЗРОБКА МЕТОДУ АНАЛІЗУ ЖИВУЧОСТІ СЕРВІСІВ ІНФОРМАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ НА МОБІЛЬНІЙ ПЛАТФОРМІ ЗА РЕСУРСНО-ЧАСОВИМИ ЗМІННИМИ

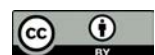
У статті розроблено метод аналізу живучості сервісів інформаційної системи на мобільній платформі за ресурсно-часовими змінними. Актуальність дослідження визначається тим, що такі системи функціонують в умовах динамічної доступності обчислювальних, енергетичних та мережних ресурсів, переривчастої зв'язності, часткової спостережуваності стану і нестаціонарності зовнішніх впливів, за яких критичні порушення формуються на рівні окремих сервісів раніше, ніж на рівні платформи в цілому. Метою роботи є розробка методу формалізованого оцінювання стану сервісів, виявлення передкритичних режимів функціонування та ранжування сервісів для оперативного параметричного керування ресурсами. Метод побудовано на адаптації підходу допустимих множин станів і бар'єрних функцій до сервісного рівня інформаційної системи. Стан сервісу подано вектором нормованих змінних, що включає рівень ресурсного забезпечення, залишковий допустимий час збереження функційної здатності та рівень виконання сервісної функції. Запропоновано показник стану живучості, його похідну за часом, правило виявлення передкритичного режиму, трирівневу класифікацію станів і правило ранжування критичних сервісів. Експериментальна перевірка на серії імітаційних сценаріїв показала, що метод забезпечує завчасне виявлення наближення сервісів до критичної області та формує випереджальний часовий інтервал до досягнення критичного стану. Практична цінність результатів полягає у можливості використання методу як аналітичного модуля в бортових багатосервісних інформаційно-обчислювальних системах мобільних платформ. Метод спирається на величини, доступні в бортовій телеметрії та журналах виконання програмних модулів, що забезпечує його відтворюваність у середовищі імітаційного моделювання та на експериментальному стенді. Для коротких циклів керування.

**Ключові слова:** живучість сервісів, інформаційна система, ресурсно-часові змінні, передкритичний режим, бар'єрна функція, параметричне керування ресурсами, ранжування сервісів.

**Постановка проблеми.** Інформаційні системи на мобільних платформах (ІСМП) функціонують в умовах динамічної доступності обчислювальних, енергетичних та мережних ресурсів, переривчастої зв'язності, часткової спостережуваності стану, нестаціонарності навантаження та деструктивних впливів [1–2]. За таких умов живучість доцільно трактувати як здатність системи зберігати або відновлювати виконання критичних функцій у реальному часі за дефіциту ресурсів, порушення зв'язності та порушення стану внутрішніх функційних рівнів [3]. Цьому різновиду інформаційних систем присвячено ряд досліджень [4–5], присвячених багаторівневому

опису ІСМП, що поєднує рівні даних, процесів і ресурсів, причинно-часові інваріанти, допустимі стани та загальні критерії живучості. У роботах [3–5] показано, що сервісний рівень є спостережуваним зрізом функціонування такої системної структури.

В основі проблематики є те, що втрата живучості в ІСМП має характер деградації, у межах якої для сервісу змінюються доступний ресурс, допустима тривалість збереження працездатності, дефіцит виконання вимог до якості обслуговування та можливість утримання функціонування в припустимій області. У ряді досліджень запропоновано підходи до інтегрального оцінювання



живучості в ІСМП [6], ризик-орієнтованого оперативного керування ресурсами [7], прогнозно-адаптивного перерозподілу ресурсів [8], а також сервісно-орієнтованого відновлення критичних сервісів у вікнах зв'язності [9]. Зазначені результати [6–9] орієнтовані на інтегральне оцінювання поточного стану, синтез керувальних дій або формування відновлювальних кроків.

Для оперативного параметричного керування ресурсами необхідно мати аналітичний опис зміни стану сервісу в координатах ресурсу та часу, оцінювання швидкості вичерпання запасу живучості та виявлення сервісів, що наближаються до зниження функціональності ІСМП швидше за інші. За відсутності такого опису керування спирається на інтегральні узагальнені показники, що згладжують критичні локальні епізоди, або на часткові індикатори, які не відображають взаємозв'язку між залишковим ресурсом, часовим запасом та розвитком деградації сервісу [10]. Отже, постає науково-технічна задача розробки методу аналізу живучості сервісів, у якому стан сервісу описується ресурсно-часовими змінними, а сервіс приймається за основну одиницю оцінювання передкритичних режимів функціонування.

Зв'язок цієї задачі з важливими практичними завданнями визначається потребою забезпечення стійкого функціонування бортових та розподілених ІСМП, зокрема систем груп безпілотних платформ, мобільних вузлів зв'язку, розподілених сенсорних мереж тощо [11], у яких рішення щодо перерозподілу ресурсу, допустимої деградації сервісів або пріоритетності підтримки функцій приймаються в коротких інтервалах оперативного керування. У таких системах несвоєчасне виявлення погіршення сервісного стану може призвести до зриву виконання критичної функції раніше, ніж інтегральні показники або механізми відновлення забезпечать достатній ефект [12]. З цієї причини розробка методу аналізу живучості сервісів за ресурсно-часовими змінними є актуальним у вирішенні прикладних задач оперативного забезпечення живучості ІСМП у реальному часі.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У останніх дослідженнях сформовано достатньо широкий масив праць, присвячених забезпеченню живучості, стійкості функціонування та відмовостійкості розподілених, кордонних і мобільних обчислювальних середовищ. В оглядових працях [13-15] систематизовано підходи до забезпечення надійного функціонування таких середовищ, виділено завдання доступності, надійності, безпеки, збереження працездатності сервісів,

а також заходи попередження порушень і реагування на них. Для подальшого розгляду важливо, що в цих працях живучість і стійкість функціонування подано як багатокомпонентну властивість, пов'язану з ресурсними обмеженнями, динамікою середовища, порушеннями мережної взаємодії та відмовами програмно-апаратних компонентів.

Окремий напрям формують праці, присвячені керуванню ресурсами та підтриманню безперервності сервісів у кордонних обчисленнях. У роботах [16-17] показано, що ресурсне планування в таких середовищах визначається обмеженістю доступних ресурсів, часовими обмеженнями виконання, міграцією сервісів, зміною умов зв'язку та вимогами до якості обслуговування. Основну увагу в цих публікаціях приділено алгоритмам розподілу ресурсу, перенесенню сервісних екземплярів між вузлами, підтриманню безперервності обслуговування та зменшенню затримок під час функціонування мобільних і кордонних систем.

Прикладні дослідження з оркестрації сервісів і компонентів деталізують цей підхід. У працях [18-19] розглянуто розміщення сервісних компонентів і ланцюгів обслуговування за умов неоднорідності вузлів, обмеженості обчислювальних ресурсів, часових вимог і потреби збереження функційної здатності сервісів. Такі результати підтверджують рівень розвитку напряму, пов'язаного з оркестрацією, розміщенням, параметричним налаштуванням і перебудовою виконання сервісів у динамічному середовищі.

Ще одну важливу групу становлять праці, присвячені каскадним відмовам у мережах Інтернету речей, промислових інформаційних мережах та залежних сервісно-мережних структурах. У роботах [20-22] каскадні відмови визначено як один із ключових чинників втрати функційної здатності складних розподілених середовищ. У цих дослідженнях запропоновано моделі поширення каскаду з урахуванням навантаження, чутливості до перевантаження, міжмережних залежностей, сервісних зв'язків та міжрівневого впливу. Дослідження включають формалізацію механізмів розвитку каскадних порушень і чинників, які прискорюють втрату функційної здатності взаємопов'язаних компонентів.

Отже, проаналізована сукупність рішень охоплює оглядові узагальнення з проблематики живучості й стійкості функціонування розподілених і кордонних систем, методи керування ресурсами, перенесення сервісів і підтримання безперервності обслуговування, підходи до оркестрації сервісних компонентів і ланцюгів оброблення,

а також моделі каскадних відмов у залежних мережах і сервісних структурах. Для задач оперативного параметричного керування ресурсами цього недостатньо, оскільки бракує методу, що дозволяє описувати сервіс через явні ресурсно-часові змінні, оцінювати залишковий інтервал допустимого функціонування, фіксувати темп вичерпання запасу живучості та виявляти передкритичні режими до переходу до процедур керування, відновлення або реконфігурації. Саме ця невіршена частина загальної проблеми визначає зміст даної статті.

**Постановка завдання.** Метою статті є розробка методу аналізу живучості сервісів інформаційної системи на мобільній платформі за ресурсно-часовими змінними для оцінювання поточного стану сервісу в умовах ресурсних та часових обмежень функціонування. Для досягнення поставленої мети необхідно формалізувати множину сервісів та критичних сервісів інформаційної системи, задати систему ресурсно-часових змінних опису їх стану, визначити показник живучості сервісу та правило виявлення переходу до критичної області функціонування, а також побудувати процедуру аналітичного ранжування сервісів за ступенем наближення до втрати працездатності як основу оперативного параметричного керування ресурсами мобільної платформи.

**Виклад основного матеріалу.** Стан живучості сервісів ІСМП формалізується за ресурсно-часовими змінними. Для цього використовується підхід допустимих множин станів і бар'єрних функцій, який застосовують у задачах аналізу динамічних систем із критичними обмеженнями [23]. У роботі цей підхід адаптовано до сервісного рівня ІСМП, де стан сервісу визначається сукупністю ресурсних і часових характеристик та поточним рівнем виконання сервісної функції.

Нехай ІСМП реалізує множину сервісів:

$$S = \{s_1, s_2, \dots, s_N\}, \quad (1)$$

де  $S_c \subseteq S$  – підмножина критичних сервісів.

Для кожного сервісу  $s_i$  визначається вектор стану:

$$\bar{x}_i(t) = \begin{bmatrix} r_i(t) \\ \tau_i(t) \\ q_i(t) \end{bmatrix}, \quad i = \overline{1, N}, \quad (2)$$

де  $r_i(t)$  – нормований рівень ресурсного забезпечення сервісу в момент часу  $t$ , який характеризує частку ресурсу, доступного сервісу відносно його поточної потреби;  $\tau_i(t)$  – залишковий час до переходу сервісу в критичну область за поточ-

ного режиму функціонування;  $q_i(t)$  – нормований рівень виконання сервісної функції, що відображає ступінь виконання порогових вимог до показників QoS [24].

Вектор  $\bar{x}_i(t)$  (2) задає мінімально достатній опис стану сервісу за ресурсною, часовою та функціональною компонентами.

Оскільки компоненти (2) мають різну смислову суть і різні масштаби варіювання, подальший аналіз виконується в нормованому просторі. Для цього вводиться перетворення:

$$\bar{z}_i(t) = D_i(\bar{x}_i(t) - \bar{x}_i^{\min}), \quad (3)$$

де  $D_i$  – діагональна матриця нормування:

$$D_i = \text{diag}\left(\frac{1}{r_i^{\max} - r_i^{\min}}, \frac{1}{\tau_i^{\max} - \tau_i^{\min}}, \frac{1}{q_i^{\max} - q_i^{\min}}\right), \quad (4)$$

де  $\bar{x}_i^{\min}$  та  $\bar{x}_i^{\max}$  – вектори нижніх та верхніх допустимих меж компонентів вектора стану  $\bar{x}_i(t)$ .

Після застосування перетворення (3) з матрицею нормування  $D_i$  (4) вектор  $\bar{z}_i(t)$  відображає положення сервісу у безрозмірному просторі нормованих змінних стану.

Допустима область функціонування сервісу  $s_i$  визначається множиною:

$$K_i = \{\bar{z}_i \in \mathbb{R}^3 | h_i(\bar{z}_i) \geq 0\}, \quad (5)$$

де  $h_i(\bar{z}_i)$  – бар'єрна функція живучості сервісу.

Далі бар'єрна функція задається квадратичною формою:

$$h_i(\bar{z}_i) = 1 - \bar{z}_i^T Q_i \bar{z}_i, \quad Q_i = Q_i^T > 0. \quad (6)$$

Матриця  $Q_i$  (6) визначає чутливість бар'єрної функції живучості сервісу до змін компонент нормованого стану та їх спільного впливу. За такого задання множина  $K_i$  (5) інтерпретується як еліпсоїдальна область допустимого функціонування у просторі нормованих змінних стану  $z_i$ .

Відповідно до  $h_i(\bar{z}_i(t))$  (6) сервіс перебуває:

- в допустимому стані, якщо  $h_i(\bar{z}_i(t)) > 0$ ;
- в граничному стані, якщо  $h_i(\bar{z}_i(t)) = 0$ ;
- в критичному стані, якщо  $h_i(\bar{z}_i(t)) < 0$ .

Ці умови задають формальний поділ простору станів на область допустимого функціонування, її межу та критичну область втрати функційної здатності.

Для подальшого аналізу застосовується еквівалентний скалярний показник, що безпосередньо відображає ступінь наближення сервісу до критичної області:

$$\psi_i(t) = \bar{z}_i^T(t) Q_i \bar{z}_i(t). \quad (7)$$

З урахуванням  $h_i(\bar{z}_i(t))$  (6) показник  $\psi_i(t)$  (7) пов'язаний з бар'єрною функцією співвідношенням:

$$h_i(\bar{z}_i(t)) = 1 - \psi_i(t). \quad (8)$$

Отже, умова припустимого функціонування сервісу набуває вигляду  $\psi_i(t) < 1$ , граничний стан визначається співвідношенням  $\psi_i(t) = 1$ , а критичний стан – нерівністю  $\psi_i(t) > 1$ .

Показник  $\psi_i(t)$  (7) надалі розглядається як аналітична міра стану живучості сервісу. Його зростання відповідає зменшенню відстані до кордону допустимої області функціонування.

Для задач оперативного аналізу істотним є урахування напряму зміни стану. З цією метою використовується оцінка інтенсивності зміни нормованого стану:

$$\dot{\bar{z}}_i(t) = \frac{d\bar{z}_i(t)}{dt}, \quad (9)$$

а для дискретного спостереження в моменти  $t_{k-1}$  і  $t_k$  використовується наближення:

$$\dot{\bar{z}}_i(t_k) = \frac{\bar{z}_i(t_k) - \bar{z}_i(t_{k-1})}{t_k - t_{k-1}}. \quad (10)$$

Тоді інтенсивність зміни показника живучості  $\psi_i(t)$  (7) (похідна показника живучості за часом) визначається співвідношенням:

$$\dot{\psi}_i(t) = 2\bar{z}_i^T(t)Q_i\dot{\bar{z}}_i(t). \quad (11)$$

Величина  $\dot{\psi}_i(t)$  (11) характеризує інтенсивність наближення стану сервісу до критичної області:

– якщо  $\dot{\psi}_i(t) > 0$ , то стан сервісу зміщується у бік кордону допустимої області функціонування;

– якщо  $\dot{\psi}_i(t) < 0$ , то стан сервісу зміщується у бік віддалення від кордону допустимої області функціонування.

На цій основі передкритичний режим функціонування сервісу визначається системою умов:

$$\psi_i(t) < 1, \quad \dot{\psi}_i(t) > \gamma_i, \quad (12)$$

де  $\gamma_i > 0$  – порогове значення інтенсивності наближення стану сервісу до критичної області.

Умова (12) означає, що сервіс ще перебуває поза критичною областю, визначеною нерівністю  $\psi_i(t) > 1$ , однак динаміка його стану відповідає наближенню до неї з інтенсивністю, що перевищує допустиме порогове значення.

Отже, у межах запропонованої постановки стан живучості сервісу  $s_i$  описується сукупністю величин:

$$\Xi_i = \langle \bar{x}_i(t), \bar{z}_i(t), \psi_i(t), \dot{\psi}_i(t) \rangle. \quad (13)$$

Для розв'язання поставленої задачі пропонується метод оперативного аналізу живучості критичних сервісів у коротких інтервалах спостереження, коли для кожного сервісу доступні поточні значення змінних стану та їх прирости. Метод ґрунтується на сумісному оцінюванні трьох характеристик сервісу: положення поточ-

ного стану відносно кордону допустимої області функціонування, напряму його зміни за  $\dot{\psi}_i(t)$  (11) та локального часу досягнення цього кордону. Така побудова забезпечує одержання аналітичного результату у формі класифікації станів і ранжованого переліку сервісів за ступенем загрози втрати функційної здатності.

Особливістю методу є перехід від контролю умови  $\psi_i(t) < 1$  до оцінювання локального вичерпання допустимої області. З цією метою використовується величина залишку допустимості  $\Delta_i(t)$ , яка є додатною в межах допустимої області, дорівнює нулю на її кордоні та набуває від'ємних значень після перетину цього кордону. На відміну від бар'єрної функції, величина  $\Delta_i(t)$  безпосередньо інтерпретується як поточна відстань за показником стану до кордону втрати функційної здатності у просторі нормованих змінних стану.

Подальший аналіз базується на припущенні, що в короткому інтервалі спостереження стан сервісу може бути подано локально лінеаризованою траєкторією в околі точки  $\bar{z}_i(t)$ . За цього припущення локальний час досягнення кордону допустимої області функціонування оцінюється співвідношенням

$$T_i^{\text{sp}}(t) = \frac{\Delta_i(t)}{\dot{\psi}_i(t) + \varepsilon}, \quad \varepsilon > 0, \quad (14)$$

де  $\varepsilon$  – регулятор, який вводиться для усунення вирождення знаменника за малих значень  $\dot{\psi}_i(t)$ , обмеження впливу похибки дискретного оцінювання похідної та забезпечення числової стійкості обчислень.

У формулі (14) параметр  $\varepsilon$  має ту саму розмірність, що й  $\dot{\psi}_i(t)$ , та обирається як мала додатна величина, менша за пороговий рівень  $\gamma_i$ , щоб не змінювати порядок ранжування сервісів у передкритичному режимі. У реальних умовах  $\varepsilon$  доцільно задавати або як малу частку порогового значення  $\gamma_i$ , тобто  $\varepsilon = \vartheta\gamma_i$ , де  $0 < \vartheta \ll 1$ , або на основі оцінки похибки визначення  $\dot{\psi}_i(t)$  за дискретними спостереженнями. За такого вибору параметр  $\varepsilon$  не впливає на змістовну інтерпретацію показника  $T_i^{\text{sp}}(t)$  та виконує функцію регуляризації за малих значень  $\dot{\psi}_i(t)$ .

Формула (14) визначає оцінку часу, через який сервіс досягне кордону допустимої області функціонування, заданого співвідношенням  $\psi_i(t) = 1$  за збереження поточного напряму та інтенсивності зміни стану. Якщо  $\dot{\psi}_i(t) \leq 0$  стан сервісу не наближається до критичної області, тому в подальшому аналізі приймається  $T_i^{\text{sp}} = +\infty$ .

Для оперативного аналізу використовується класифікація станів сервісів на три класи. Індекс класу сервісу  $s_i$  визначається правилом:

$$\kappa_i(t) = \begin{cases} 0, & \psi_i(t) < 1, \quad \dot{\psi}_i(t) \leq \gamma_i, \\ 1, & \psi_i(t) < 1, \quad \dot{\psi}_i(t) > \gamma_i, \\ 2, & \psi_i(t) \geq 1. \end{cases} \quad (15)$$

Клас  $\kappa_i(t) = 0$  відповідає допустимому режиму функціонування, для якого умова  $\psi_i(t) < 1$  виконується, а інтенсивність наближення стану до критичної області не перевищує порогового значення  $\gamma_i$ . Клас  $\kappa_i(t) = 1$  відповідає передкритичному режиму: сервіс ще перебуває в допустимій області, однак  $\dot{\psi}_i(t) > \gamma_i$ . Клас  $\kappa_i(t) = 2$  відповідає критичному режиму, та визначається умовою  $\psi_i(t) \geq 1$ . Класифікація (15) забезпечує відокремлення сервісів, для яких потрібне випереджальне керувальне втручання, від сервісів зі стабільним перебуванням у допустимій області.

Для встановлення пріоритету аналізу в межах класів  $\kappa_i(t) = 0$  та  $\kappa_i(t) = 1$  використовується індикатор наближення втрати функційної здатності:

$$\eta_i(t) = w_i \frac{\max\{0, \dot{\psi}_i(t) - \gamma_i\}}{\Delta_i(t) + \varepsilon}, \quad w_i > 0 \quad (16)$$

де  $w_i$  – ваговий коефіцієнт, що відображає функціональну значущість сервісу для ІСМП.

Індикатор (16) зростає за двох умов: коли сервіс наближається до кордону допустимої області функціонування, тобто  $\Delta_i(t) \rightarrow 0$ , та коли інтенсивність наближення його стану до критичної області перевищує порогове значення  $\gamma_i$ . За такого подання в одному показнику поєднуються поточне наближення сервісу до кордону критичної області та інтенсивність зміни його стану в цьому напрямі. Величина  $w_i$  дає змогу враховувати функціональну значущість сервісу для системи без зміни способу опису стану сервісу, заданого співвідношеннями (5)–(13).

На основі (15), (16) формується правило ранжування сервісів. Спочатку всі сервіси впорядковуються за класом  $\kappa_i(t)$  у спадному порядку, тобто сервіси класу 2 мають найвищий пріоритет аналізу, сервіси класу 1 розташовуються після них, а сервіси класу 0 – наприкінці переліку. Усередині кожного класу впорядкування здійснюється за спаданням значення  $\eta_i(t)$ . Отже, для двох сервісів  $s_i$  та  $s_j$  правило пріоритету має вигляд:

$$s_i \succ s_j \Leftrightarrow (\kappa_i(t) > \kappa_j(t)) \vee (\kappa_i(t) = \kappa_j(t) \wedge \eta_i(t) \geq \eta_j(t)), \quad (17)$$

Співвідношення (17) задає повний порядок сервісів за ступенем наближення до втрати функційної здатності в поточному інтервалі спостереження.

У процедурному поданні метод реалізується за такою послідовністю.

Крок 1. Для кожного критичного сервісу  $s_i \in S_c$  використовуються поточні значення  $r_i(t)$ ,  $\tau_i(t)$ ,  $q_i(t)$ , формується вектор стану  $\bar{x}_i(t)$  та виконується нормування згідно з (3), (4).

Крок 2. За нормованим станом  $\bar{z}_i(t)$  обчислюється показник живучості  $\psi_i(t)$  та визначається скалярна міра віддалення від кордону допустимої області  $\Delta_i(t)$ , яка є додатною в межах допустимої області, дорівнює нулю на її кордоні та набуває від’ємних значень після його перетину.

Крок 3. За двома сусідніми спостереженнями оцінюється  $\dot{z}_i(t)$ , після чого обчислюється інтенсивність зміни показника живучості  $\dot{\psi}_i(t)$ .

Крок 4. Для сервісу визначається клас стану  $\kappa_i(t)$ . Для сервісів, для яких  $\dot{\psi}_i(t) > 0$  додатково оцінюється локальний час досягнення критичної кордону допустимої області функціонування  $T_i^p(t)$ . Якщо  $\dot{\psi}_i(t) \leq 0$ , то приймається  $T_i^p(t) = +\infty$ .

Крок 5. Для сервісів, що залишаються в допустимій області функціонування, обчислюється індикатор наближення до втрати функційної здатності  $\eta_i(t)$ .

Крок 6. На множині  $S_c$  формується ранжований перелік сервісів за правилом (17), який визначає поточну послідовність аналізу за ступенем наближення до втрати функційної здатності.

Перевага запропонованого методу полягає в тому, що його побудовано на локальних характеристиках стану сервісу без формування окремого сценарного прогнозу та без синтезу керувального впливу на етапі аналізу. У межах методу оцінюються поточний стан сервісу, його віддаленість від кордону допустимої області функціонування та інтенсивність наближення до цього кордону. У результаті формується аналітична основа, придатна для подальшого використання в контурі оперативного параметричного керування ресурсами, де ранжований перелік сервісів може визначати послідовність та глибину керувального впливу.

Експериментальну перевірку запропонованого методу виконано на серії імітаційних сценаріїв функціонування критичних сервісів ІСМП. Метою експерименту було оцінювання двох властивостей методу: здатності виявляти передкритичний режим до перетину кордону критичної області та здатності формувати вимірюваний часовий інтервал для підготовки керувальної реакції. У кожному сценарії для сервісів обчислювалися значення показника стану живучості  $\psi_i(t)$  та інтенсивності його зміни  $\dot{\psi}_i(t)$  відповідно до співвідношень (7), (11), а класифікація стану сервісу виконувалася за правилом (15). Далі фіксувалися два моменти часу: момент входу сервісу в передкритичний режим та момент досягнення кордону критичної області  $\psi_i(t) = 1$ . Різниця між цими моментами розглядалася як часовий інтервал випереджального виявлення.

На рис. 1 наведено часові траєкторії показників  $\psi_i(t)$  та  $\dot{\psi}_i(t)$  для трьох умовних сервісів  $s_1$ ,  $s_2$ ,  $s_3$ , що відрізняються інтенсивністю наближення стану до критичної області.

На рис. 1 а) подано траєкторію показника  $\psi_i(t)$ ; суцільна горизонтальна лінія відповідає кордону допустимої області функціонування, заданому співвідношенням  $\psi_i(t)=1$ . На рис. 1 б) подано траєкторії  $\dot{\psi}_i(t)$ ; штрихова горизонтальна лінія відповідає пороговому значенню  $\gamma_i$ , що визначає передкритичний режим за умовою (12). Крпкові вертикальні лінії фіксують моменти входу сервісів у передкритичний режим, а штрихова вертикальна лінія – момент досягнення сервісом  $s_2$  кордону допустимої області функціонування.

Аналіз рис. 1 показує, що метод забезпечує виявлення передкритичного режиму до моменту досягнення кордону допустимої області функціонування. Для сервісу  $s_3$  передкритичний режим фіксується раніше, ніж виконується умова  $\psi_i(t)=1$ , причому часовий інтервал між цими подіями є найбільшим серед розглянутих траєкторій. Це узгоджується з характером його динаміки: величина  $\dot{\psi}_i(t)$  раніше перевищує порогове значення

$\gamma_i$  та зберігає додатні значення протягом більшого інтервалу часу. Для сервісу  $s_2$  передкритичний режим також виявляється завчасно, однак відповідний часовий інтервал є меншим, ніж для  $s_3$ , що відповідає меншій інтенсивності наближення до критичної області. Для сервісу  $s_1$  траєкторія  $\psi_i(t)$  залишається в допустимій області функціонування, а після локального максимуму спостерігається зменшення показника, яке супроводжується переходом  $\dot{\psi}_i(t)$  до від’ємних значень. У цьому випадку метод не формує помилкового віднесення сервісу до передкритичного режиму, оскільки такий режим оцінюється з урахуванням положення траєкторії відносно кордону допустимої області та напряму зміни стану.

Одержаний результат має визначальне значення для практичного застосування методу. Показник  $\psi_i(t)$  відображає поточне положення стану сервісу відносно кордону допустимої області функціонування, проте сам по собі не забезпечує достатньої інформації щодо інтенсивності наближення до критичної області. Включення до аналізу похідної  $\dot{\psi}_i(t)$  дає змогу відокремити стійкі допустимі стани від режимів, у яких за умови  $\psi_i(t) < 1$

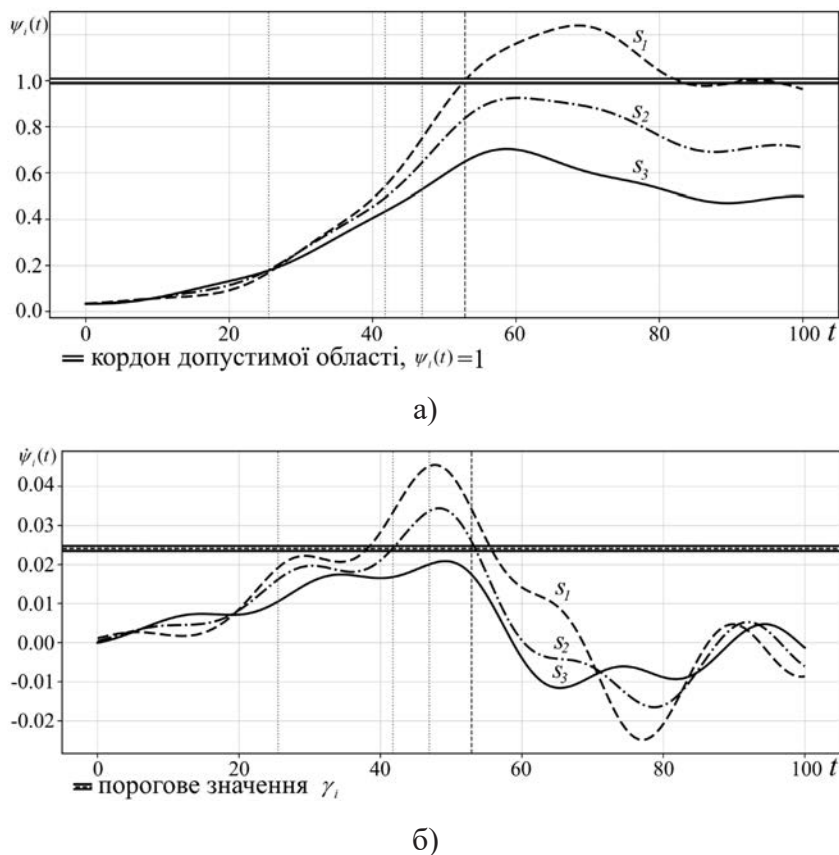


Рис. 1. Часові траєкторії показників стану живучості для трьох сервісів: а) траєкторія  $\psi_i(t)$  відносно кордону допустимої області функціонування  $\psi_i(t)=1$ ; б) траєкторія  $\dot{\psi}_i(t)$  відносно порогового значення  $\gamma_i$

вже сформовано динаміку наближення до втрати функційної здатності. Саме ця властивість надає методу випереджального характеру.

На рис. 2 наведено узагальнені результати серії сценаріїв для множини сервісів  $s_1 - s_6$ . Столпчиковою діаграмою показано середній часовий інтервал випереджального виявлення, тобто середню різницю між моментом фіксації передкритичного режиму та моментом досягнення кордону допустимої області функціонування. Лінійною діаграмою, віднесеною до другої осі ординат, показано середній момент досягнення критичного стану.

З рис. 2 видно, що для всіх розглянутих сервісів метод забезпечує додатний часовий інтервал випереджального виявлення, який перебуває в межах від 19.5 до 27.0 умовних одиниць часу. Найбільше значення отримано для сервісу  $s_1$ , найменше – для сервісу  $s_6$ , проте навіть у цьому випадку зберігається достатній інтервал часу для підготовки рішень у контурі оперативного параметричного керування ресурсами.

Розподіл значень на рис. 2 також має змістову інтерпретацію. Для сервісів, у яких передкритичний режим фіксується раніше відносно моменту досягнення критичного стану, часовий інтервал випереджального виявлення є більшим. Для сервісів, у яких перехід до критичного стану відбувається швидше, цей інтервал зменшується. Таким чином, рис. 2 підтверджує, що метод враховує не лише поточне положення стану відносно кордону допустимої області функціонування, а й інтенсив-

ність його зміни, що узгоджується з використанням показників  $\Delta_i(t)$ ,  $T_i^p(t)$ ,  $\eta_i(t)$ .

У контексті практичного використання результату рис. 1 та рис. 2 підтверджують дві визначальні властивості запропонованого методу. По-перше, метод забезпечує стає виявлення передкритичних режимів до моменту переходу стану сервісу в критичну область. По-друге, таке виявлення супроводжується вимірюваним випереджальним часовим інтервалом, придатним для використання в задачах випереджального перерозподілу ресурсів, зміни параметрів функціонування сервісу або підготовки відновлювального впливу. Завдяки цьому аналіз живучості сервісів набуває прикладного значення як окремий аналітичний модуль у складі засобів оперативного забезпечення живучості ІСМП.

Отже, обчислювальний експеримент підтвердив працездатність запропонованого методу в частині виявлення передкритичних режимів та формування випереджального часового інтервалу до втрати функційної здатності. Це дає підстави розглядати метод як придатний для вбудовування в контур оперативного параметричного керування ресурсами, де результати ранжування сервісів та оцінювання часу досягнення критичного стану можуть використовуватися для визначення пріоритетів підтримки критичних функцій.

У прикладному аспекті запропонований метод доцільно віднести до бортових інформаційно-обчислювальних систем мобільних платформ,

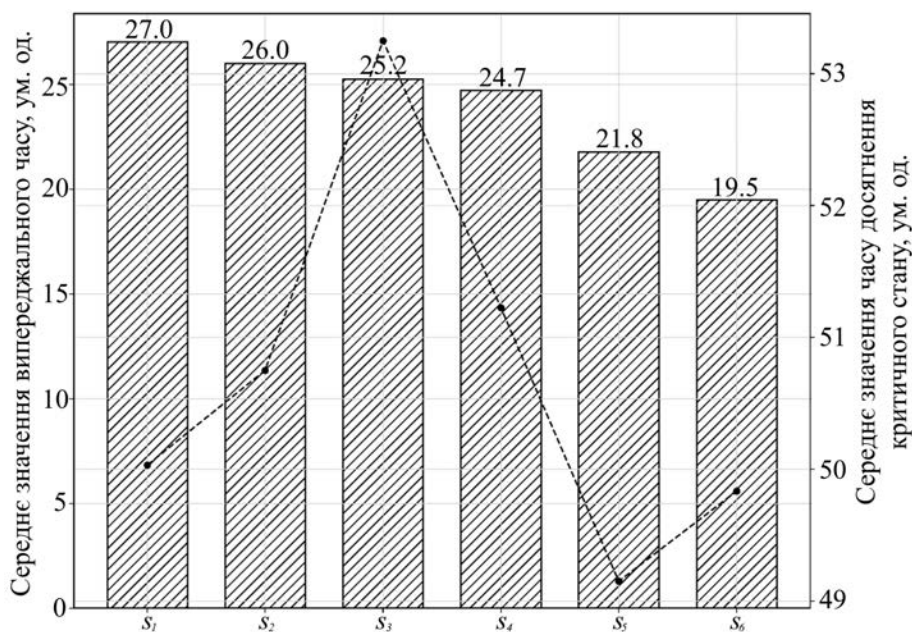


Рис. 2. Узагальнені результати серії сценаріїв для сервісів  $s_1 - s_6$

у яких одночасно функціонують кілька критичних сервісів із різною ресурсною інтенсивністю та різними часовими вимогами до збереження функційної здатності. Типовим прикладом є безекіпажна або робототехнічна платформа, на якій паралельно функціонують сервіси навігаційного оцінювання стану, стабілізації руху, злиття сенсорних даних, технічного зору, виявлення та супроводу об'єктів, передавання телеметрії, а також міжмодульної координації обчислень. У таких системах деградація має сервісний характер: критичний стан формується внаслідок вичерпання доступного процесорного часу, пам'яті, енергетичного ресурсу або пропускну здатності внутрішнього чи зовнішнього каналу обміну, причому втрата функційної здатності окремого сервісу настає раніше, ніж формується повна відмова мобільної платформи. Саме для цього класу систем показники, визначені в методі, мають безпосередній фізичний зміст:

– компонент  $r_i(t)$  може інтерпретуватися як доступний обчислювальний або енергетичний ресурс ІСМП;

– компонент  $\tau_i(t)$  – як залишковий допустимий час збереження функційної здатності сервісу до порушення функціональних вимог;

– компонент  $q_i(t)$  – як узагальнений нормований показник рівня виконання сервісної задачі, наприклад точності оцінювання стану, достовірності розпізнавання, затримки видачі результату або частки втрачених даних.

За таких умов метод дає змогу перейти від загального спостереження за навантаженням платформи до локального аналізу сервісів, для яких поточний стан ще залишається допустимим, однак напрям його зміни вже вказує на швидке наближення до кордону критичної області.

Прикладна цінність методу в цій області визначається тим, що він спирається на величини, безпосередньо доступні в бортовій телеметрії та журналах виконання програмних модулів. Достатньо мати поточні оцінки доступного ресурсу, залишкового допустимого часу збереження функційної здатності сервісу та фактичного рівня виконання сервісної функції. Це робить метод відтворюваним у середовищі імітаційного моделювання

та на експериментальному стенді з реальним обчислювальним модулем мобільної платформи. Застосовність методу обґрунтовується тим, що в багатосервісних бортових системах саме сервіс є об'єктом аналізу, найближчим до цільової функції системи. Метод формує основу для завчасного виявлення наближення стану критичних сервісів до критичної області, що дає змогу своєчасно перейти до параметричного обмеження навантаження, зміни частоти обробки даних, перерозподілу обчислювального ресурсу або переходу до спрощеного режиму функціонування до моменту зриву основної місії ІСМП.

**Висновки.** У роботі розроблено метод аналізу живучості сервісів ІСМП за ресурсно-часовими змінними. Метод забезпечує оцінювання стану сервісу в нормованому просторі змінних стану, виявлення передкритичного режиму за сукупністю положення стану відносно кордону допустимої області функціонування та інтенсивності його зміни, а також ранжування сервісів для подальшого оперативного параметричного керування ресурсами. Формалізація через бар'єрну функцію, показник  $\psi_i(t)$ , його похідну  $\dot{\psi}_i(t)$ , класифікацію станів та правило пріоритету, на відміну від відомих підходів, дозволили змогу перейти від інтегрального спостереження за станом системи до аналітичного опису динаміки окремих критичних сервісів.

Результати обчислювального експерименту підтвердили працездатність методу та його прикладну придатність для багатосервісних бортових інформаційно-обчислювальних систем мобільних платформ. Показано, що метод забезпечує завчасне виявлення передкритичних режимів і формує випереджальний часовий інтервал до досягнення критичного стану, достатній для підготовки керувального впливу. Практична цінність одержаних результатів полягає у можливості використання методу як аналітичного модуля в контурах оперативного забезпечення живучості, де необхідно визначати пріоритети підтримки критичних функцій. Подальші дослідження доцільно спрямувати на врахування міжсервісних залежностей та інтеграцію одержаних оцінок у процедури адаптивного перерозподілу ресурсів у реальному часі.

#### Список літератури:

1. Ergenç, D., Memedi, A., Fischer, M., Dressler, F. Resilience in Edge Computing: Challenges and Concepts. *Foundations and Trends® in Networking*. 2025. Vol. 14, no. 4, 254–340. DOI: <https://doi.org/10.1561/13000000074>
2. Cassottana, B., Roomi, M. M., Mashima, D., Sansavini, G. Resilience analysis of cyber-physical systems: A review of models and methods. *Risk Analysis*. 2023. Vol. 43, no. 11, 2359–2379 DOI: <https://doi.org/10.1111/risa.14089>

3. 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), 78–100. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2025.4.078>
4. Ruban I., Tkachov V. Formalizing the Survivability Target Function of Information System on Mobile Platform. *International conference proceedings Computer and Information Systems and Technologies*. Kharkiv, 2025. P. 32–34. URL: <https://openarchive.nure.ua/entities/publication/c29c6715-1e49-4e8f-988c-ebab8b059edf>
5. Dodonov A., Lande D. Modeling the survivability of network structures. *CEUR Workshop Proceedings*. 2021. Vol. 2859, P. 1–10. URL: <https://ceur-ws.org/Vol-2859/paper1.pdf>
6. Cao Z., Zhao H., Wang Y., He C., Zhou D., Han X. A Resilience Quantitative Assessment Framework for Cyber-Physical Systems: Mathematical Modeling and Simulation. *Applied Sciences*. 2025. Vol. 15, no. 15, article no. 8285. <https://doi.org/10.3390/app15158285>
7. 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, 424–441. DOI: <https://doi.org/10.15276/aait.08.2025.27>
8. Zhou S., Ali A., Al-Fuqaha A., Omar M., Feng L. Robust Risk-Sensitive Task Offloading for Edge-Enabled Industrial Internet of Things. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*. 2023. Vol. 70, no. 1, 1403–1413. DOI: <https://doi.org/10.1109/tce.2023.3323146>
9. Colarusso C., Falco I., Zimeo E. Business continuity of Cloud-based IoT applications through a seamless continuum. *Internet of Things*. 2025. Vol. 33, article no. 101723. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.iot.2025.101723>
10. Segovia-Ferreira M., Rubio-Hernan J., Cavalli A. R., Garcia-Alfaro J. A Survey on Cyber-Resilience Approaches for Cyber-Physical Systems. *ACM Computing Surveys*. 2024. Vol. 56, no. 8, article no. 202, 1–37. DOI: <https://doi.org/10.1145/3652953>
11. Fesenko H., Illiashenko O., Kharchenko V., Leichenko K., Sachenko A., Scislo L. Methods and Software Tools for Reliable Operation of Flying LiFi Networks in Destruction Conditions. *Sensors*. 2024. Vol. 24, no. 17, article no. 5707. DOI: <https://doi.org/10.3390/s24175707>
12. Moskalenko V., Kharchenko V., Semenov S. Model and Method for Providing Resilience to Resource-Constrained AI-System. *Sensors*. 2024. Vol. 24, no. 18, article no. 5951. DOI: <https://doi.org/10.3390/s24185951>
13. Amiri Z., Heidari A., Navimipour N. J., Unal M. Resilient and dependability management in distributed environments: a systematic and comprehensive literature review. *Cluster Computing*. 2023. № 26, 1565–1600. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10586-022-03738-5>
14. Batista A. d. S., Santos A. L. d. A Survey on Resilience in Information Sharing on Networks: Taxonomy and Applied Techniques. *ACM Computing Surveys*. 2024. Volume 56, Issue 12, article no. 302, 1–36. DOI: <https://doi.org/10.1145/3659944>
15. J. de la Croix Kiguigouleli Ki, Zerbo B., Soma M. Multi-Criteria Optimization for Service Placement and Migration in Collaborative Edge Computing. *Intelligent and Converged Networks*. 2025. Volume 6, Issue 4, pp. 278-288, DOI: <https://doi.org/10.23919/ICN.2025.0022>.
16. 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, article no. 184. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10586-024-04893-7>
17. Zhang Y., Zhao K., Yang Y., Zhou Z. Real-Time Service Migration in Edge Networks: A Survey. *Journal of Sensor and Actuator Networks*, Vol. 14, no. 4, article no. 79. DOI: <https://doi.org/10.3390/jsan14040079>
18. Laroui M., Khedher H. I., Mounghla H., Afifi H. Service Function Chains multi-resource orchestration in Virtual Mobile Edge Computing. *Computer Networks*. 2023. Vol. 224, article no. 109582. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2023.109582>
19. Feng K., Luo L., Xia Y., Luo B., He X., Li K., Zha Z., Xu B., Peng K. Optimizing Microservice Deployment in Edge Computing with Large Language Models: Integrating Retrieval Augmented Generation and Chain of Thought Techniques. *Symmetry*. 2024. Vol. 16, no. 11., article no. 1470. DOI: <https://doi.org/10.3390/sym16111470>
20. Fu X., Wang Y., Yang Y., Postolache O. Analysis on cascading reliability of edge-assisted Internet of Things. *Reliability Engineering & System Safety*. 2022. Vol. 223, article no. 108463. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.res.2022.108463>
21. Fu X., Zheng D., Liu X., Xing L., Peng R. Systematic review and future perspectives on cascading failures in Internet of Things: Modeling and optimization. *Reliability Engineering & System Safety*. 2024. Vol. 254, article no. 110582. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.res.2024.110582>
22. Zhu L., Fu X., Liu X., Du S. Modeling and analysis of cascade failures in Industrial Internet of Things based on task decomposition and service communities. *Computers & Industrial Engineering*. 2025. Vol. 206, article no. 111177. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2025.111177>
23. Ames A. D., Xu X., Grizzle J. W., Tabuada P. Control Barrier Function Based Quadratic Programs for Safety Critical Systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*. 2017. Vol. 62, no. 8, 3861–3876. DOI: <https://doi.org/10.1109/tac.2016.2638961>
24. Kasilov O. V., Dmytruk K. S. Model of Dynamic Load Balancing in A Swarm Network of Drones. *Scientific notes of Taurida National V.I. Vernadsky University. Series: Technical Sciences*. 2025. Vol. 1, no. 4. P. 53–61. DOI: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.4.1/07>

**Tkachov V.M., Ruban I.V. DEVELOPMENT OF A METHOD FOR ANALYZING THE SURVIVABILITY OF INFORMATION SYSTEM SERVICES ON A MOBILE PLATFORM BASED ON RESOURCE-TIME VARIABLES**

*This paper develops a method for analyzing the survivability of information system services on a mobile platform based on resource-time variables. The relevance of the study is determined by the fact that such systems operate under dynamically varying availability of computing, energy, and network resources, intermittent connectivity, partial observability of system state, and non-stationary external impacts, under which critical disruptions emerge at the level of individual services earlier than at the platform level as a whole. The aim of the study is to develop a method for formalized assessment of service states, detection of pre-critical operating modes, and ranking of services for operational parametric resource control. The method is based on adapting the approach of admissible state sets and barrier functions to the service level of the information system. The service state is represented by a vector of normalized variables including the level of resource provision, the residual admissible time for preserving functional capability, and the level of service function execution. A survivability state indicator, its time derivative, a rule for pre-critical mode detection, a three-level state classification, and a ranking rule for critical services are proposed. Experimental verification on a series of simulation scenarios has shown that the method provides early detection of service-state convergence to the critical region and forms an anticipatory time interval before the critical state is reached. The practical value of the results lies in the possibility of using the method as an analytical module in onboard multi-service information-computing systems of mobile platforms. The method relies on quantities available from onboard telemetry and software module execution logs, which ensures its reproducibility both in a simulation environment and on an experimental testbed. This makes the method suitable for short control cycles.*

**Keywords:** *service survivability, information system, resource-time variables, pre-critical mode, barrier function, parametric resource control, service ranking.*

Дата першого надходження статті до видання: 21.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 16.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 19.05.2026