

## **Метод аналізу живучості сервісів інформаційної системи на мобільній платформі за каскадних порушень**

*У статті розглянуто проблему аналізу живучості сервісів інформаційної системи на мобільній платформі за каскадних порушень, актуальність якої зумовлена динамічною доступністю обчислювальних, мережних та енергетичних ресурсів, переривчастотою зв'язністю, частковою спостережуваністю стану та обмеженим часом на прийняття керувальних рішень. Встановлено, що локальний аналіз сервісів за первинним порушенням не забезпечує повного відображення фактичної втрати живучості, оскільки не враховує каскадне поширення порушення через міжсервісні залежності.*

*Метою дослідження є розроблення методу аналізу живучості сервісів ІСМП, який дає змогу формально виявляти зміну станів сервісів під впливом первинного та вторинно зумовленого порушення, визначати початкові джерела каскадного процесу, кордон його поширення та внесок міжсервісних залежностей у втрату живучості системи. Запропоновано метод, що ґрунтується на сервісному поданні системи у вигляді структури залежностей, введенні нормованих характеристик первинного порушення, локальної межі його компенсації сервісом, активності сервісних залежностей і покроковому визначенні фронтів каскадного процесу. У межах методу формалізовано множини сервісів, що втрачають живучість безпосередньо під дією первинного впливу та внаслідок каскадного поширення порушення, введено показники для кількісного оцінювання частки втрат, зумовлених міжсервісними залежностями.*

*Отримані результати на модельному сценарії зі зростанням інтенсивності первинного порушення показали стійке розходження між локальною оцінкою втрати живучості та оцінкою з урахуванням каскадного поширення, що дало змогу фіксувати початок каскадного підсилення раніше, ніж локальний аналіз, і виокремлювати приховану частку сервісних втрат за відсутності безпосередньої втрати критичних сервісів. Практична цінність результатів полягає у придатності методу для задач оперативного параметричного керування ресурсами, локалізації порушень та динамічного резервування системних ресурсів.*

**Ключові слова:** *живучість; інформаційна система; критичний сервіс; сервісне подання; міжсервісні залежності.*

**Актуальність теми.** Інформаційні системи на мобільних платформах (ІСМП) функціонують за умов одночасної динамічної зміни доступності обчислювальних, мережних та енергетичних ресурсів, мобільності вузлів, часткової спостережуваності стану та обмеженого часу на прийняття керувальних рішень [1–3]. Для такого класу систем визначальними є короткі інтервали оперативного керування, вікна зв'язності зі змінною тривалістю та пропускну здатністю, а також потреба в адаптації сервісів до поточної конфігурації платформи за наявності порушень зв'язності, перевантажень і відмов окремих компонентів [2–4]. У цих умовах живучість доцільно розглядати як інтегральну властивість ІСМП, що характеризує здатність зберігати та/або відновлювати виконання критичних функцій у реальному часі за ресурсної недостатності, порушень зв'язності та невизначеності щодо поточного стану системи [1, 4, 5].

У структурно та функціонально залежних ІСМП порушення стану окремого сервісу, процесу або ресурсу не обмежується локальним ефектом. За наявності міжсервісних, міжпроцесних та міжресурсних залежностей первинне порушення може переходити в послідовність вторинних змін стану, що поширюються по вертикальних та горизонтальних зв'язках і знижують функціональну спроможність ІСМП у цілому [6–8]. Тому масштаб втрати живучості визначається інтенсивністю первинного впливу, топологією залежностей, структурою навантаження, конфігурацією активних зв'язків та локальною спроможністю окремих сервісів компенсувати функційне порушення [6–8].

Наявні дослідження формують важливе підґрунтя для аналізу живучості, адаптації та стійкості кордонних і IoT-середовищ [2, 3, 5], для моделювання каскадних відмов у взаємозалежних мережах [6–8]. Разом з тим поза безпосереднім фокусом цих підходів залишається аналітичне подання зміни станів сервісів ІСМП у сервісному поданні на скінченному інтервалі функціонування, коли необхідно формально розмежовувати первинні та вторинні порушення, визначати кордон фактичного поширення каскаду та оцінювати внесок міжсервісних залежностей у втрату живучості критичних сервісів [5, 7, 8]. Це має безпосереднє значення для оперативного керування ресурсами, динамічного резервування, відновлення критичних сервісів та реконфігурації ІСМП, оскільки такі процедури потребують аналітичного подання

розвитку сервісних станів, придатного для своєчасного вибору керувальних дій. З огляду на це розроблення методу аналізу живучості сервісів інформаційної системи на мобільній платформі за каскадних порушень є актуальною науково-прикладною задачею.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій, на які спираються автори.** У дослідженні [5] систематизовано сучасні підходи до забезпечення живучості в середовищах кордонних обчислень з урахуванням специфіки мобільних кордонних обчислень. Тут живучість розглядається як комплексна властивість, що формується під впливом відмов інфраструктури, енергетичних збоїв, безпекових інцидентів, мобільності вузлів та порушень зв'язності, і показують, що для таких середовищ аналіз повинен охоплювати обчислювальні, мережні та сервісні підсистеми. Значущість результатів дослідження [5] полягає в обґрунтуванні багатоконтурного характеру живучості в динамічних умовах функціонування системи. Водночас праця [5] має значну оглядову спрямованість і не доводить постановку до формалізованого методу аналізу зміни станів окремих сервісів за каскадних порушень на скінченному інтервалі аналізу функціонування системи.

У праці [7] запропоновано модель каскадних відмов для індустріального Інтернету речей (IIoT) на основі взаємозалежного кіберсервісного подання, у якій враховано декомпозицію завдань, структуру сервісних груп та схеми зв'язку між взаємопов'язаними поданнями. Така постановка демонструє, що каскадне поширення визначається топологією мережі та функціональною організацією сервісів і конфігурацією міжвузлових взаємозв'язків. Разом з тим у роботі [7] основну увагу зосереджено на моделюванні каскадної поведінки IIoT-систем і на дослідженні характеристик відмов у промисловому середовищі, тоді як задача формального розмежування первинних та вторинних порушень на рівні сервісів ІСМП у ній окремо не формалізована.

У праці [8] розглянуто живучість мереж управління та зв'язку за каскадних відмов у поєднаних залежних мережах, для яких запропоновано модель асиметричних групових залежностей і стратегії перерозподілу навантаження. Результати досліджень [8] підтверджують суттєвий вплив структури залежностей на перебіг каскаду та на підсумкову живучість мережі. Водночас робота [8] орієнтована на мережний рівень аналізу, на характеристики зв'язаних підсистем та на ефективність стратегій перерозподілу навантаження, а не на аналітичне подання сервісних станів як окремого об'єкта дослідження.

Унаслідок аналізу праць [5, 7, 8] встановлено, що сучасні вузькопрофільні дослідження формують науково-прикладну основу для розгляду живучості інформаційної системи в умовах динамічної ресурсної доступності, порушень зв'язності та каскадного поширення відмов, однак зосереджуються переважно на концептуальному описі живучості, моделюванні надійності взаємозалежних підсистем або на мережних механізмах перерозподілу навантаження. Це не дозволяє повною мірою формалізувати підхід до аналізу живучості саме сервісів ІСМП, який у межах скінченного інтервалу аналізу її функціонування давав би змогу формально відокремлювати первинні та вторинні порушення, встановлювати зміну станів сервісів у процесі розвитку каскаду порушень та оцінювати внесок міжсервісних залежностей у втрату живучості сервісного подання системи. Саме це визначає доцільність розробки спеціального методу аналізу живучості сервісів ІСМП за каскадних порушень.

**Метою статті** є розробка методу аналізу живучості сервісів ІСМП за каскадних порушень, який у межах скінченного інтервалу аналізу її функціонування забезпечує формальне виявлення зміни станів сервісів під впливом первинних та вторинних порушень, встановлення умов переходу локального порушення в каскадне, визначення кордону поширення каскаду в сервісному поданні та оцінювання внеску міжсервісних залежностей у втрату живучості системи.

**Викладення основного матеріалу.** Розглядається ІСМП, для якої на кожному скінченному інтервалі функціонування використовується сервісне подання. Зокрема, розглядаються сервіси та залежності між ними, через які безпосередньо проявляються наслідки порушень для основної функції ІСМП.

Нехай  $S = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$  – множина сервісів ІСМП,  $S^{cr} \subseteq S$  – підмножина критичних сервісів, втрата або недопустиме зниження функційної здатності яких призводить до порушення виконання основної функції ІСМП. Сервісне подання системи задається орієнтованим графом сервісних залежностей:

$$G_s = \langle S, E, W \rangle, \quad (1)$$

де  $E$  – множина дуг залежності між сервісами;  $W = \{w_{ji}\}$  – множина вагових коефіцієнтів передавання порушення між сервісами.

Наявність дуги  $(s_j, s_i) \in E$  означає, що зміна стану сервісу  $s_j$  може спричинити зміну стану сервісу  $s_i$ . Коефіцієнт  $w_{ji} \in [0,1]$  характеризує частку порушення стану сервісу  $s_j$ , яка за наявності залежності передається сервісу  $s_i$ . Значення  $w_{ji}$  визначається з урахуванням ступеня функціональної обумовленості сервісу  $s_i$  станом сервісу  $s_j$ , обсягу спільно використовуваних ресурсів, інтенсивності обміну даними та критичності цієї залежності для виконання сервісної функції. Чим більше значення  $w_{ji}$ , тим істотніше порушення стану сервісу  $s_j$  впливає на сервіс  $s_i$  у межах поточного інтервалу функціонування ІСМП.

Для кожного сервісу  $s_i$  вводиться множина сервісів, що мають безпосередній вплив на його стан:

$$\Pi_i = \{s_j \in S | (s_j, s_i) \in E\}. \quad (2)$$

Оскільки у динамічних умовах функціонування мобільної платформи не всі залежності є однаково активними в кожний момент часу, то для кожної дуги  $(s_j, s_i) \in E$  вводиться індикатор активності  $\beta_{ji}(t) \in \{0,1\}$ . Якщо  $\beta_{ji}(t) = 1$ , то це означає, що у момент часу  $t$  між сервісами  $s_i$  та  $s_j$  наявний фактичний функціональний або ресурсний зв'язок, через який порушення може передаватися далі. Це відповідає ситуації, коли сервіс  $s_i$  у поточному режимі реально використовує дані, результат оброблення, канал обміну або спільний ресурс, пов'язаний із сервісом  $s_j$ . Значення  $\beta_{ji}(t) = 0$  означає, що така залежність у момент часу  $t$  не реалізується, тому відповідний канал поширення порушення є неактивним.

Для кожного сервісу  $s_i$  задається величина  $a_i(t) \in [0,1]$ , що визначає найбільший нормований рівень сумарного порушення, що може бути компенсований цим сервісом у момент часу  $t$  без переходу в стан втрати функціональної здатності. Таким чином,  $a_i(t)$  характеризує індивідуальну спроможність сервісу протидіяти порушенню за поточного рівня ресурсного забезпечення, доступності залежних компонентів та допустимого локального зниження показників функціонування. У цьому дослідженні величина  $a_i(t)$  використовується як агрегована характеристика і не деталізується за окремими ресурсно-часовими координатами.

Первинний деструктивний вплив на сервіс  $s_i$  у момент часу  $t$  описується величиною  $p_i(t) \in [0,1]$ . Якщо  $p_i(t) = 0$ , то первинне порушення відсутнє. А якщо  $p_i(t)$  зростає, то відбувається збільшення інтенсивності зовнішнього впливу на цей сервіс.

Для формального відокремлення зовнішнього первинного впливу від каскадного поширення порушень у межах кожного моменту часу  $t$  вводиться дискретний індекс кроку каскадного розгортання  $\ell = 0,1,2, \dots$ . На кроці  $\ell = 0$  враховується лише первинний вплив, а на наступних кроках – вторинні порушення, що виникають унаслідок передавання порушення через активні сервісні залежності.

Вторинна складова порушення сервісу  $s_i$  на кроці  $\ell$  визначається співвідношенням:

$$c_i^{(\ell)}(t) = \sum_{s_j \in \Pi_i} \beta_{ji}(t) w_{ji} \chi_j^{(\ell-1)}(t), \quad \ell \geq 1, \quad (3)$$

де  $\chi_j^{(\ell-1)}(t)$  – надлишкова частина нормованого рівня порушення функціонування сервісу  $s_j$ , що на попередньому кроці перевищила його локальну спроможність до компенсації і тому може передаватися сервісам, що залежать від його стану, відповідно до сервісного подання (1)  $G_s$  та множини (2)  $\Pi_i$ .

Для нульового кроку в  $c_i^{(\ell)}(t)$  (3) покладається  $c_i^{(0)}(t) = 0$ . Сумарний нормований рівень порушення функціонування сервісу  $s_i$  на кроці  $\ell$  задається так:

$$y_i^{(\ell)}(t) = p_i(t) + c_i^{(\ell)}(t). \quad (4)$$

Відповідно поточний резерв компенсації порушення сервісом  $s_i$  на кроці  $\ell$  визначається різницею:

$$m_i^{(\ell)}(t) = a_i(t) - y_i^{(\ell)}(t). \quad (5)$$

Якщо  $m_i^{(\ell)}(t) > 0$ , то сервіс  $s_i$  у межах даного кроку каскадного розгортання зберігає функціональну здатність. Якщо ж  $m_i^{(\ell)}(t) \leq 0$ , то сумарний рівень порушення  $y_i^{(\ell)}(t)$  (4) перевищує локальну спроможність сервісу до його компенсації, визначену величиною  $a_i(t)$  і сервіс  $s_i$  стає джерелом подальшого поширення порушення на сервіси, функціонування яких залежить від його стану.

Частина нормованого рівня порушення, що може передаватися далі в межах сервісного подання системи, визначається як перевищення сумарного рівня порушення над локальною спроможністю сервісу до його компенсації:

$$\chi_i^{(\ell)}(t) = \max\{0, -m_i^{(\ell)}(t)\}. \quad (6)$$

Таким чином, каскадне порушення в сервісному поданні ІСМП трактується як послідовний процес переходу від первинних порушень  $p_i(t)$  до вторинних складових  $c_i^{(\ell)}(t)$  (3), які виникають лише тоді, коли для деякого сервісу виконується умова  $m_i^{(\ell)}(t) \leq 0$  (5), а відповідна сервісна залежність є активною, тобто  $\beta_{ji}(t) = 1$ . Така постановка дає змогу аналітично відокремити порушення, що компенсуються в межах локальної спроможності сервісу, від порушень, які перевищують цю спроможність, набувають форми  $\chi_i^{(\ell)}(t)$  (6) та поширюються на інші сервіси.

Для подальшого аналізу вводиться індикатор участі сервісу  $s_i$  у каскадному процесі:

$$\gamma_i^{(\ell)}(t) = \begin{cases} 1, & \chi_i^{(\ell)}(t) > 0, \\ 0, & \chi_i^{(\ell)}(t) = 0. \end{cases} \quad (7)$$

Тоді множина сервісів, охоплених каскадним порушенням на кроці  $\ell$ , має вигляд:

$$C^{(\ell)}(t) = \{s_i \in S | \gamma_i^{(\ell)}(t) = 1\}. \quad (8)$$

Співвідношення (3–8) формують подання каскадного порушення на рівні сервісів і дають змогу визначати джерело поширення порушення, умову його подальшого передавання та множину сервісів, для яких порушення вийшло за межі локальної спроможності до компенсації ІСМП.

На відміну від підходів, у яких живучість системи аналізується на основі моделей стійких систем і структурної живучості мереж [9, 10] або через інтегральне оцінювання каскадного ризику [11], у даній роботі розвиток каскадного порушення розглядається в межах сервісного подання системи як послідовність фронтів поширення вторинного порушення. Це дає змогу встановлювати, які сервіси перейшли за локальну межу компенсації порушення безпосередньо під дією первинного впливу, а які – унаслідок каскадного передавання порушення через активні сервісні залежності, а також визначати кордон фактичного охоплення ІСМП каскадним процесом на скінченному інтервалі функціонування системи.

Початковий фронт каскадного процесу утворюють сервіси, для яких первинний нормований рівень порушення  $p_i(t)$  перевищує локальну межу його компенсації, що задається величиною  $a_i(t)$ . Для цього вводиться множина:

$$F^{(0)}(t) = \{s_i \in S | p_i(t) - a_i(t) > 0\}. \quad (9)$$

Множина сервісів, що вже охоплені каскадним процесом до кроку  $\ell$ , визначається рекурентно. На нульовому кроці маємо  $R^{(0)}(t) = F^{(0)}(t)$ . Щоб виключити повторне врахування того самого сервісу в циклічних залежностях, на кожному наступному кроці вторинне порушення передається лише від сервісів поточного фронту. Тоді приріст вторинної складової порушення, що надходить на сервіс  $s_i$  від фронту  $F^{(\ell-1)}(t)$ , задається так:

$$q_i^{(\ell)}(t) = \sum_{s_j \in F^{(\ell-1)}(t)} \beta_{ji}(t) w_{ji} \chi_j^{(\ell-1)}(t), \quad \ell \geq 1. \quad (10)$$

Накопичений нормований рівень вторинного порушення до кроку  $\ell$  визначається рекурентно:

$$u_i^{(\ell)}(t) = u_i^{(\ell-1)}(t) + q_i^{(\ell)}(t), \quad u_i^{(0)}(t) = 0. \quad (11)$$

Сумарний нормований рівень порушення функціонування сервісу  $s_i$  з урахуванням первинної та вторинної складових на кроці  $\ell$  подається співвідношенням:

$$d_i^{(\ell)}(t) = p_i(t) + u_i^{(\ell)}(t). \quad (12)$$

Відповідна різниця між локальною межею компенсації порушення сервісом та сумарним нормованим рівнем порушення визначається так:

$$r_i^{(\ell)}(t) = a_i(t) - d_i^{(\ell)}(t). \quad (13)$$

Новий фронт каскадного процесу на кроці  $\ell$  утворюють сервіси, які раніше ще не були охоплені каскадом, але після надходження приросту вторинного порушення  $q_i^{(\ell)}(t)$  (10) перейшли за локальну межу компенсації, тобто для них виконується умова  $r_i^{(\ell)}(t) \leq 0$  (13). Для цього вводиться множина:

$$F^{(\ell)}(t) = \{s_i \in S \setminus R^{(\ell-1)}(t) | r_i^{(\ell)}(t) \leq 0, q_i^{(\ell)}(t) > 0\}, \ell \geq 1. \quad (14)$$

Тоді множина сервісів, охоплених каскадним процесом до кроку  $\ell$ , має вигляд:

$$R^{(\ell)}(t) = R^{(\ell-1)}(t) \cup F^{(\ell)}(t). \quad (15)$$

Частина нормованого рівня порушення, що може передаватися далі сервісами нового фронту, визначається як перевищення сумарного нормованого рівня порушення над локальною межею його компенсації:

$$\chi_i^{(\ell)}(t) = \begin{cases} a_i^{(\ell)}(t) - a_i(t), & \text{не використовується,} \\ \max\{0, -r_i^{(\ell)}(t)\}, & s_i \in F^{(\ell)}(t), \\ 0, & s_i \notin F^{(\ell)}(t). \end{cases} \quad (16)$$

Оскільки в межах подальшого поширення враховується лише та частина нормованого рівня порушення, яка перевищує локальну межу його компенсації сервісом, у подальших обчисленнях використовуються друга та третя гілки співвідношення (16), тобто:

$$\chi_i^{(\ell)}(t) = \begin{cases} \max\{0, -r_i^{(\ell)}(t)\}, & s_i \in F^{(\ell)}(t), \\ 0, & s_i \notin F^{(\ell)}(t). \end{cases} \quad (17)$$

Каскадний процес на скінченному інтервалі аналізу вважається завершеним на найменшому кроці  $L(t)$ , для якого новий фронт не виникає:  $L(t) = \min\{\ell \geq 1 | F^{(\ell)}(t) = \emptyset\}$ . Оскільки множина сервісів  $S$  є скінченною, а кожен сервіс може бути включений до фронту не більше одного разу, то виконується оцінка  $L(t) \leq |S|$ . Умова  $F^{(\ell)}(t) = \emptyset$  означає, що після кроку  $L(t)$  жоден новий сервіс не переходить за локальну межу компенсації порушення, а отже подальше поширення каскадного порушення в межах поточного інтервалу аналізу припиняється.

Після завершення процедури аналізу кінцева множина сервісів, охоплених каскадним порушенням у момент часу  $t$ , визначається як  $R^*(t) = R^{(L(t)-1)}(t)$ . Множина сервісів, що втратили здатність компенсувати порушення безпосередньо під дією первинного впливу, тобто є початковими джерелами

каскадного процесу, має вигляд  $R^{pr}(t) = F^{(0)}(t)$ . Множина сервісів, які перейшли в стан втрати функціональної здатності лише внаслідок вторинного поширення порушення, визначається так:

$$R^{ind}(t) = R^*(t) \setminus R^{pr}(t). \quad (18)$$

Співвідношення (18) дає змогу формально розмежувати первинне порушення та вторинне поширення порушення в сервісах ІСМП.

Для аналітичного опису кордону каскаду вводиться множина сервісів, на які вже поширився вторинний вплив, однак сумарний нормований рівень порушення для них ще не досяг локальної межі компенсації:

$$B(t) = \{s_i \in S \setminus R^*(t) \mid 0 < u_i^{(L(t)-1)} < a_i(t) - p_i(t)\}. \quad (19)$$

Множина  $B(t)$  інтерпретується як кордон каскадного порушення в сервісному поданні системи. Сервіси цієї множини вже зазнали вторинного впливу, проте ще не перейшли у стан втрати функціональної здатності. За прикладним змістом саме ці сервіси підлягають першочерговому контролю в процедурі оперативного керування, якщо порушення не буде локалізоване або якщо в наступному такті аналізу активізуються додаткові сервісні залежності.

Для оцінювання внеску міжсервісних залежностей у втрату живучості конкретного сервісу доцільно порівнювати резерв до локальної межі компенсації порушення без урахування каскадного поширення та після завершення каскадного процесу. Початковий резерв без урахування вторинного впливу визначається так:

$$r_i^0(t) = \max\{0, a_i(t) - p_i(t)\}. \quad (20)$$

Кінцевий резерв після врахування каскадного процесу визначається так:

$$r_i^*(t) = \max\{0, a_i(t) - p_i(t) - u_i^{(L(t)-1)}(t)\}. \quad (21)$$

Тоді абсолютне зменшення резерву до локальної межі компенсації порушення сервісом, зумовлене саме міжсервісним поширенням порушення, має вигляд:

$$\Delta_i^c(t) = r_i^0(t) - r_i^*(t). \quad (22)$$

Якщо сервіс не зазнав вторинного впливу або якщо цей вплив не змінив його резерв до локальної межі компенсації порушення, то  $\Delta_i^c(t) = 0$ . Величина (22) зростає зі збільшенням внеску каскадного поширення у втрату живучості сервісу. Для відокремлення сервісів, які перейшли у критичний стан саме внаслідок каскадного поширення, вводиться індикатор вторинно зумовленої втрати живучості:

$$\mu_i(t) = \begin{cases} 1, & p_i(t) < a_i(t) \wedge p_i(t) + u_i^{(L(t)-1)}(t) \geq a_i(t). \\ 0, & \text{інакше.} \end{cases} \quad (23)$$

Якщо  $\mu_i(t) = 1$ , то сервіс  $s_i$  не переходив би у критичний стан лише під дією первинного впливу, однак входить у цей стан після врахування каскадного поширення порушення. Отже, індикатор  $\mu_i(t)$  фіксує той клас сервісів, для яких каскадні порушення є безпосередньою причиною втрати живучості.

Для нормованого порівняння сервісів з різними значеннями локальної межі компенсації порушення вводиться відносний показник каскадно зумовленої втрати живучості сервісу:

$$\theta_i(t) = \frac{\Delta_i^c(t)}{\max\{a_i(t), \varepsilon\}}, \quad 0 < \varepsilon \ll 1. \quad (24)$$

Показник  $\theta_i(t)$  (24) дає змогу порівнювати внесок каскадного поширення порушення у втрату живучості сервісів з різними значеннями локальної межі компенсації порушення. Зі збільшенням  $\theta_i(t)$ , зростає частка втрати живучості сервісу, зумовлена міжсервісним поширенням порушення.

Параметр  $\varepsilon$  у формулі (24) є сталою, що вводиться для запобігання невизначеності при нормуванні [12] у випадках нульового або близького до нуля значення  $a_i(t)$ . Його використання забезпечує додатність знаменника, числову стійкість обчислення показника  $\theta_i(t)$  та коректність порівняння сервісів, не змінюючи змістовної інтерпретації показника для випадків, коли локальна межа компенсації порушення має ненульове значення.

З урахуванням співвідношень (9–15, 18, 19) та (22–24) метод аналізу живучості сервісів за каскадних порушень реалізується у вигляді послідовності кроків:

Крок 1. За величинами  $a_i(t)$  та  $p_i(t)$  визначається початковий фронт каскадного процесу  $F^{(0)}(t)$  (9);

Крок 2. Покроково обчислюються прирости вторинного порушення  $q_i^{(\ell)}(t)$  (10), накопичені значення  $u_i^{(\ell)}(t)$  (11), сумарні нормовані рівні порушення  $d_i^{(\ell)}(t)$  (12), відповідні різниці  $r_i^{(\ell)}(t)$  (13), нові фронти  $F^{(\ell)}(t)$  (14) та множини сервісів  $R^{(\ell)}(t)$  (15), охоплених каскадним процесом до поточного кроку, – до моменту, коли новий фронт перестає виникати;

Крок 3. Формуються множини сервісів, що втратили здатність компенсувати порушення безпосередньо під дією первинного впливу, множина  $R^{ind}(t)$  (18) сервісів, для яких втрата живучості зумовлена каскадним поширенням порушення, та множина  $B(t)$ , що визначає кордон каскаду;

Крок 4. Для кожного сервісу визначаються показники  $\Delta_i^c(t)$  (22),  $\mu_i(t)$  (23) та  $\theta_i(t)$  (24), які кількісно характеризують внесок міжсервісних залежностей у втрату живучості.

Таким чином, запропонований метод у сервісному поданні ІСМП дає змогу встановлювати початкові джерела каскадного процесу, відстежувати фронти його покрокового поширення, визначати множину сервісів, охоплених каскадним порушенням, та кордон його фактичного поширення, формально відокремлювати первинне порушення від вторинного, а також кількісно оцінювати внесок міжсервісних залежностей у втрату живучості кожного сервісу.

Для перевірки аналітичних можливостей запропонованого методу розглянуто модельний сценарій, у межах якого інтенсивність первинного порушення  $\alpha$  послідовно зростає, а для кожного її значення визначається частка сервісів, що втратили здатність компенсувати порушення. На рисунку 1 наведено порівняння двох варіантів аналізу: локального, який враховує лише первинне порушення, та аналізу із застосуванням запропонованого методу, який додатково враховує каскадне передавання порушення між залежними сервісами. Окремо подано частку втрачених критичних сервісів.

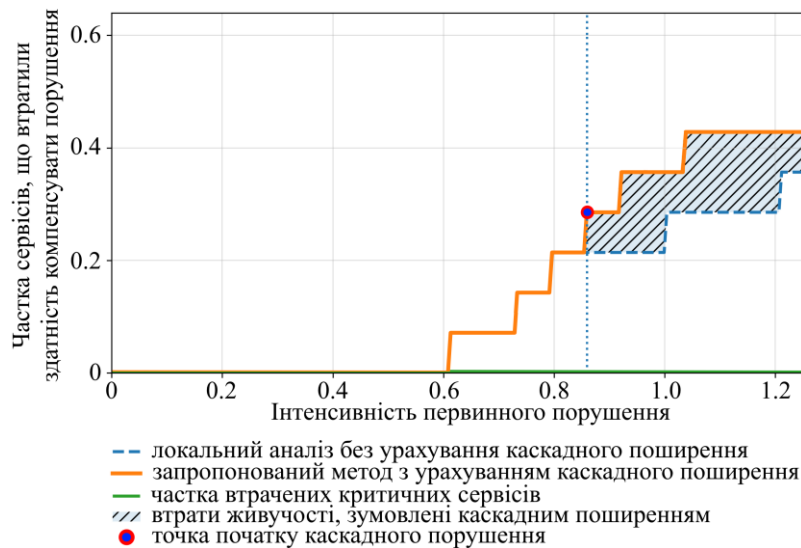


Рис. 1. Вплив каскадного поширення порушення на втрату живучості сервісів

Для інтерпретації результатів аналізу вводяться такі узагальнені характеристики:

$$\eta^{pr}(\alpha) = \frac{|R^{pr}(\alpha)|}{|S|}, \quad (25)$$

$$\eta^*(\alpha) = \frac{|R^*(\alpha)|}{|S|}, \quad (26)$$

$$\delta\eta^c(\alpha) = \eta^*(\alpha) - \eta^{pr}(\alpha), \quad (27)$$

$$\eta^{cr}(\alpha) = \frac{|R^*(\alpha) \cap S^{cr}|}{|S^{cr}|}. \quad (28)$$

У формулах (25–28):

- $\eta^{pr}(\alpha)$  – характеризує частку сервісів, що втратили здатність компенсувати порушення лише під дією первинного впливу;
- $\eta^*(\alpha)$  – характеризує фактичну частку сервісів, охоплених втратою живучості після завершення каскадного процесу;
- $\delta\eta^c(\alpha)$  – характеризує частку втрат, зумовлених каскадним поширенням порушення і не виявлених локальним аналізом без урахування сервісних залежностей;
- $\eta^{cr}(\alpha)$  – характеризує частку критичних сервісів, що перейшли у стан втрати живучості.

З рисунка 1 видно, що в області малих значень  $\alpha$  залежності (25) та (26) збігаються на нульовому рівні. Це означає, що первинний вплив ще не досягає рівня, за якого хоча б один сервіс переходить за локальну межу компенсації порушення. За таких значень  $\alpha$  каскадне поширення порушення не активізується, а система зберігає виконання сервісних функцій без вторинно зумовлених втрат.

Подальше зростання  $\alpha$  приводить до першого принципово важливого ефекту: залежність  $\eta^*(\alpha)$  (26), що відповідає запропонованому методу, відхиляється від нульового рівня раніше, ніж залежність  $\eta^{pr}(\alpha)$  (25), що відповідає локальному аналізу. Це означає, що вже за значень первинного впливу, які ще не приводять до втрати живучості сервісів за результатами локального аналізу, у ІСМП виникають вторинно зумовлені втрати, пов'язані з поширенням порушення через сервісні залежності. Отже, локальний аналіз ще не фіксує такі втрати, тоді як запропонований метод уже виявляє включення каскадного механізму. Саме ця зона є найбільш показовою з погляду аналітичних можливостей методу, оскільки вона демонструє

його придатність до виявлення прихованого розвитку каскадного процесу до моменту, коли локальна оцінка починає сигналізувати про порушення.

Вертикальна пунктирна лінія на рисунку 1 позначає початок каскадного підсилення. Починаючи з цієї точки, розходження між кривими  $\eta^*(\alpha)$  (26) та  $\eta^{pr}(\alpha)$  (25) набуває стійкого характеру. Фізичний зміст цього ефекту полягає в тому, що частина порушення, яка перевищила локальну межу його компенсації в уже уражених сервісах, передається через активні сервісні залежності та спричиняє перехід залежних сервісів у стан втрати живучості. Унаслідок цього фактична частка сервісів, охоплених втратою живучості, визначена за  $\eta^*(\alpha)$  (26) виявляється вищою, ніж частка сервісів, яку фіксує локальний аналіз за  $\eta^{pr}(\alpha)$  (25). Заштрихована область між кривими відображає значення  $\delta\eta^c(\alpha)$ , тобто частку сервісних втрат, зумовлених каскадним поширенням порушення та не виявлених локальним аналізом без урахування сервісних залежностей.

Ступінчастий характер обох кривих має прикладне пояснення. Кожний приріст відповідає переходу одного або групи сервісів у стан втрати живучості після досягнення порогового значення сумарного нормованого рівня порушення. Для залежності  $\eta^{pr}(\alpha)$  (25) такі переходи визначаються лише первинним впливом. Для залежності  $\eta^*(\alpha)$  (26) вони додатково зумовлені накопиченням вторинного порушення, що надходить від сервісів попередніх фронтів каскадного процесу. Саме тому прирости для  $\eta^*(\alpha)$  (26) виникають раніше та мають більшу інтенсивність.

Важливим результатом є те, що у розглянутому сценарії залежність  $\eta^{cr}(\alpha)$  (28), яка характеризує втрати критичних сервісів, зберігається на нульовому рівні в усьому дослідженому діапазоні  $\alpha$ . Це означає, що каскадний процес уже приводить до помітної втрати живучості сервісів системи у цілому, однак критичні сервіси ще не перейшли у стан втрати живучості. З прикладного погляду такий результат є принципово важливим, оскільки запропонований метод дає змогу виявити небезпечну фазу розвитку каскадного процесу до безпосереднього ураження критичних сервісів. Це формує часовий резерв для оперативного параметричного керування ресурсами, локалізації порушення або реконфігурації сервісних залежностей.

Ще одна суттєва особливість рисунка полягає в тому, що після початку каскадного підсилення розрив між кривими не зникає, а зберігається на всьому подальшому інтервалі. Це свідчить про структурний характер вторинно зумовлених втрат. Вони не є випадковим одноразовим ефектом, а формуються як наслідок конфігурації сервісних залежностей. Збереження непорожності множини  $R^{ind}(t)$  на істотному діапазоні значень  $\alpha$  означає, що міжсервісні залежності формують додаткову складову втрат живучості, яка змінює результат її оцінювання.

Таким чином, результати, подані на рисунку 1, підтверджують працездатність запропонованого методу та його аналітичну придатність для виявлення каскадного поширення порушення в сервісному поданні ІСМП. Метод дає змогу визначати момент початку каскадного підсилення, формально розмежовувати первинні та вторинно зумовлені втрати, кількісно оцінювати приховану частку втрат  $\delta\eta^c(\alpha)$  (27) та виявляти стани, за яких система вже переходить у критичний режим функціонування, хоча критичні сервіси ще не втратили живучості. Саме ця властивість визначає прикладну цінність отриманих результатів для задач оперативного керування ресурсами, раннього попередження про розвиток каскадного процесу та обґрунтованого вибору моменту локалізації порушення.

У прикладному аспекті запропонований метод може бути використаний, наприклад, в інформаційній системі, яка розгорнута на базі групи цивільних безпілотних літальних апаратів, що виконують інспекцію протяжного об'єкта, наприклад ділянки трубопроводу, лінії електропередачі або мостового переходу з використанням алгоритмів поведінки зграй у природі [13]. У такій системі множина сервісів  $S$  формується сервісами навігації, локалізації, побудови маршруту, міжапаратної координації, релейного передавання даних, потокового відеоспостереження, геоприв'язки кадрів та бортової обробки зображень, що реалізуються спеціальними компонентами [14]. Якщо один із апаратів виконує роль проміжного ретранслятора, то первинне порушення може полягати, наприклад, у зниженні пропускної здатності каналу зв'язку або в перевантаженні його бортового обчислювального вузла. За таких умов безпосередньо порушується сервіс передавання даних на цьому апараті та сервіси геоприв'язки, міжапаратної синхронізації та оновлення маршрутних рішень на інших платформах, які використовують той самий потік даних або залежать від нього в поточному циклі роботи. Саме в такому випадку локальний аналіз окремого сервісу не відображає повного масштабу втрат, тоді як запропонований метод дає змогу встановити, які сервіси є первинно порушеними, які перейшли у стан втрати живучості внаслідок каскадного поширення порушення, і де проходить кордон фактичного охоплення системи каскадним процесом.

Практична цінність такого аналізу полягає в тому, що його результати можуть бути безпосередньо використані для вибору керувальної дії в поточному циклі функціонування ІСМП. Якщо за результатами аналізу встановлено, що каскадне поширення вже охоплює сервіси міжапаратної координації та геоприв'язки, але ще не призвело до втрати критичних сервісів навігації та безпечного керування польотом, система керування може до настання критичного стану виконати цілеспрямовану реконфігурацію: перевести частину потоків у режим зниженої інтенсивності, змінити топологію релейного

обміну, призначити інший апарат проміжним вузлом передавання, перерозподілити обчислювальне навантаження між бортовими та наземними ресурсами або тимчасово зменшити частоту надходження відеоданих на користь підтримки сервісів координації. У такій постановці метод використовується як аналітичний засіб виявлення саме тих міжсервісних переходів, які визначають момент, коли локальне порушення вже починає змінювати працездатність усієї системи.

**Висновки та перспективи подальших досліджень.** У роботі розв'язано задачу аналізу живучості сервісів ІСМП за каскадних порушень. У роботі встановлено, що для ІСМП локальний аналіз стану сервісів за первинним порушенням не забезпечує повного відображення фактичної втрати живучості, оскільки не враховує каскадне поширення порушення між залежними сервісами. Показано, що за наявності міжсервісних залежностей у системі може формуватися додаткова частка втрат живучості, яка не виявляється локальним аналізом без урахування сервісних залежностей та потребує окремого аналітичного оцінювання.

Розроблено метод аналізу живучості сервісів ІСМП за каскадних порушень, який ґрунтується на сервісному поданні системи у вигляді структури залежностей, описі первинного впливу та вторинно зумовленого поширення порушення, а також на покроковому визначенні фронтів каскадного процесу. Запропонований метод дає змогу визначати початкові джерела каскадного процесу, формально відокремлювати сервіси, що втратили живучість безпосередньо під дією первинного впливу, від сервісів, для яких така втрата зумовлена каскадним поширенням порушення, встановлювати кордон фактичного охоплення сервісів каскадним процесом та кількісно оцінювати внесок міжсервісних залежностей у втрату живучості.

Працездатність запропонованого методу підтверджено на модельному сценарії зі зростанням інтенсивності первинного порушення, для якого виявлено стійке розходження між локальною оцінкою втрати живучості та оцінкою з урахуванням каскадного поширення порушення. Це дало змогу кількісно виокремити частку сервісних втрат, зумовлених міжсервісними залежностями та не виявлених локальним аналізом, а також фіксувати початок каскадного підсилення раніше, ніж це забезпечує локальний аналіз. Одержані результати є придатними для використання в задачах оперативного параметричного керування ресурсами, раннього виявлення розвитку каскадного процесу та обґрунтованого вибору моменту локалізації порушення.

Отримав подальший розвиток підхід до аналітичного оцінювання станів сервісів ІСМП в умовах дії деструктивних чинників, оскільки до розгляду введено механізм каскадного передавання порушення між сервісами та формальний опис його внеску у втрату живучості системи. Подальші дослідження доцільно спрямувати на поширення запропонованого методу на випадок змінної активності сервісних залежностей у часі, з урахуванням вікон зв'язності зі змінною тривалістю та пропускнуою здатністю, а також на інтеграцію одержаних аналітичних оцінок у процедури оперативного параметричного керування ресурсами та динамічного резервування.

#### Список використаної літератури:

1. A Survey on Resilience in the IoT / C.Berger, P.Eichhammer, H.P. Reiser and other // ACM Computing Surveys. – 2022. – Vol. 54, Issue 7. – P. 1–39. DOI: 10.1145/3462513.
2. Singh R. A survey of mobility-aware Multi-access Edge Computing: Challenges, use cases and future directions / R.Singh, R.Sukapuram, S.Chakraborty // Ad Hoc Networks. – 2022. – Vol. 140. DOI: 10.1016/j.adhoc.2022.103044.
3. Adaptation in Edge Computing: A review on design principles and research challenges / F.Golpayegani, N.Chen, N.Afraz and other // ACM Transactions on Autonomous and Adaptive Systems. – 2024. – Vol. 19, Issue 3. – P. 1–43. DOI: 10.1145/3664200.
4. Batista A. de S. A Survey on Resilience in Information Sharing on Networks: Taxonomy and Applied Techniques / A. de S. Batista, A.L. Dos Santos // ACM Computing Surveys. – 2024. – Vol. 56, Issue 12. – P. 1–36. DOI: 10.1145/3659944.
5. Resilience in Edge Computing: Challenges and Concepts / D.Ergenç, A.Memedi, M.Fischer and other // Foundations and Trends® in Networking. – 2025. – Vol. 14, № 4. – P. 254–340. DOI: 10.1561/13000000074.
6. Failure dependence and cascading failures: A literature review and research opportunities / Y.Zhao, B.Cai, V.Cozzani, Y.Liu // Reliability Engineering & System Safety. – 2025. – Vol. 256. DOI: 10.1016/j.res.2024.110766.
7. Modeling and analysis of cascade failures in Industrial Internet of Things based on task decomposition and service communities / L.Zhu, X.Fu, X.Liu and other // Computers & Industrial Engineering. – 2025. – Vol. 206. DOI: 10.1016/j.cie.2025.111177.
8. Zhao B. Study on the resilience of command and control networks to cascading failures based on asymmetric group dependencies / B.Zhao, M.Wang, W.Lin // Scientific Reports. – 2025. – Vol. 15, № 1. DOI: 10.1038/s41598-025-14921-0.
9. Models of Resilient Systems with Online Verification Considering Changing Requirements and Latent Failures / V.Kharchenko, Y.Ponochovnyi, S.Dotsenko and other // System Dependability – Theory and Applications (DepCoS-RELCOMEX 2024). Lecture Notes in Networks and Systems. – Cham, 2024. – Vol. 1026. – P. 90–99. DOI: 10.1007/978-3-031-61857-4\_9.

10. Dynamic survivability of two-layer networks: The role of interlayer coupling / *Y.Wang, Z.Sun, H.Zhang and other* // *Chaos, Solitons & Fractals*. – 2024. – Vol. 180. DOI: 10.1016/j.chaos.2024.114571.
11. Tkachov V. Integral survivability metric of an information system on a mobile platform under functional cascading and secondary failures / *V.Tkachov, I.Ruban* // *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*. – 2025. – № 4 (34). – P. 78–100. DOI: 10.30837/2522-9818.2025.4.078.
12. Module-based regularization improves Gaussian graphical models when observing noisy data / *M.Neuman, J.Calatayud, V.Tasselius, M.Rosvall* // *Applied Network Science*. – 2024. – Vol. 9. DOI: 10.1007/s41109-024-00612-8.
13. Барабаш О. Дослідження алгоритмів поведінки зграй у природі для можливості застосування в групових польотах безпілотних літальних апаратів / *О.Барабаш, А.Кур'янов* // *Вимірjuвальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*. – 2023. – № 3. – С. 40–49. DOI: 10.31891/2219-9365-2023-75-4.
14. Кучеренко О.І. Огляд технічних та програмних засобів керування БПЛА / *О.І. Кучеренко, Т.А. Вакалюк* // *Вісник Херсонського національного технічного університету*. – 2024. – № 2 (89). – С. 170–176. DOI: 10.35546/kntu2078-4481.2024.2.24.

#### References:

1. Berger, C., Eichhammer, P., Reiser, H.P. et al. (2022), «A Survey on Resilience in the IoT», *ACM Computing Surveys*, Vol. 54, Issue 7, pp. 1–39, doi: 10.1145/3462513.
2. Singh, R., Sukapuram, R. and Chakraborty, S. (2022), «A survey of mobility-aware Multi-access Edge Computing: Challenges, use cases and future directions», *Ad Hoc Networks*, Vol. 140, doi: 10.1016/j.adhoc.2022.103044.
3. Golpayegani, F., Chen, N., Afraz, N. et al. (2024), «Adaptation in Edge Computing: A review on design principles and research challenges», *ACM Transactions on Autonomous and Adaptive Systems*, Vol. 19, Issue 3, pp. 1–43, doi: 10.1145/3664200.
4. Batista, A. de S. and Dos Santos, A.L. (2024), «A Survey on Resilience in Information Sharing on Networks: Taxonomy and Applied Techniques», *ACM Computing Surveys*, Vol. 56, Issue 12, pp. 1–36, doi: 10.1145/3659944.
5. Ergenç, D., Memedi, A., Fischer, M. et al. (2025), «Resilience in Edge Computing: Challenges and Concepts», *Foundations and Trends® in Networking*, Vol. 14, No. 4, pp. 254–340, doi: 10.1561/13000000074.
6. Zhao, Y., Cai, B., Cozzani, V. et al. (2025), «Failure dependence and cascading failures: A literature review and research opportunities», *Reliability Engineering & System Safety*, Vol. 256, doi: 10.1016/j.res.2024.110766.
7. Zhu, L., Fu, X., Liu, X. et al. (2025), «Modeling and analysis of cascade failures in Industrial Internet of Things based on task decomposition and service communities», *Computers & Industrial Engineering*, Vol. 206, doi: 10.1016/j.cie.2025.111177.
8. Zhao, B., Wang, M., Lin, W. et al (2025), «Study on the resilience of command and control networks to cascading failures based on asymmetric group dependencies», *Scientific Reports*, Vol. 15, No. 1, doi: 10.1038/s41598-025-14921-0.
9. Kharchenko, V., Ponochovnyi, Y., Dotsenko, S. et al. (2024), «Models of Resilient Systems with Online Verification Considering Changing Requirements and Latent Failures», *System Dependability – Theory and Applications. DepCoS-RELCOMEX 2024. Lecture Notes in Networks and Systems*, Cham, Vol. 1026, pp. 90–99, doi: 10.1007/978-3-031-61857-4\_9.
10. Wang, Y., Sun, Z., Zhang, H. et al. (2024), «Dynamic survivability of two-layer networks: The role of interlayer coupling», *Chaos, Solitons & Fractals*, Vol. 180, doi: 10.1016/j.chaos.2024.114571.
11. Tkachov, V. and 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*, No. 4 (34), pp. 78–100, doi: 10.30837/2522-9818.2025.4.078.
12. Neuman, M., Calatayud, J., Tasselius, V. et al. (2024), «Module-based regularization improves Gaussian graphical models when observing noisy data», *Applied Network Science*, Vol. 9, doi: 10.1007/s41109-024-00612-8.
13. Barabash, O. and Kyryanov, A. (2023), «Doslidzhennya alhorytmiv povedinky zgray u pryrodі dlya mozhlyvosti zastosuvannya v hrupovykh polyotakh bezpilotnykh litalnykh aparativ», *Vymiryvalna ta obchyslyvalna tekhnika v tekhnologichnykh protsesakh*, No. 3, pp. 40–49, doi: 10.31891/2219-9365-2023-75-4.
14. Kucherenko, O.I. and Vakalyuk, T.A. (2024), «Ohlyad tekhnichnykh ta prohramnykh zasobiv keruvannya BPLA», *Visnyk Khersonskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu*, No. 2 (89), pp. 170–176, doi: 10.35546/kntu2078-4481.2024.2.24.

**Ткачов Віталій Миколайович** – кандидат технічних наук, доцент, докторант кафедри електронних обчислювальних машин Харківського національного університету радіоелектроніки.

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

Наукові інтереси:

– технології забезпечення живучості інформаційних систем на мобільній платформі.

E-mail: vitalii.tkachov@nure.ua.

**Рубан Ігор Вікторович** – доктор технічних наук, професор, професор кафедри електронних обчислювальних машин, ректор Харківського національного університету радіоелектроніки.

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

Наукові інтереси:

– кібернетична безпека інформаційних систем;

– методи і засоби цифрової обробки зображень.

E-mail: ihor.ruban@nure.ua.

**Tkachov V.M., Ruban I.V.**

**A method for analyzing service survivability of an information system  
on a mobile platform under cascading disruptions**

The article examines the problem of analyzing the survivability of services in an information system deployed on a mobile platform under cascading disruptions. The relevance of this problem is driven by the dynamic availability of computing, network, and energy resources, intermittent connectivity, partial observability of the system state, and limited time for making control decisions. It has been established that local service analysis based solely on a primary disruption does not provide a complete representation of the actual loss of survivability, since it does not account for the cascade propagation of disruptions through inter-service dependencies. The aim of the study is to develop a method for analyzing the survivability of services in an information system on a mobile platform that enables the formal identification of service-state changes under the impact of primary and secondary disruption, the determination of the initial sources of the cascade process, the boundary of its propagation, and the contribution of inter-service dependencies to the loss of system survivability. The proposed method is based on a service-level representation of the system as a dependency structure, the introduction of normalized characteristics of the primary disruption, a service-specific local disruption compensation threshold, the activity of service dependencies, and the stepwise identification of the fronts of the cascade process. Within the proposed method, the sets of services that lose survivability directly under the primary impact and as a result of cascade propagation are formalized, and indicators for the quantitative assessment of the share of losses caused by inter-service dependencies are introduced. The results obtained in a model scenario with increasing primary disruption intensity revealed a persistent divergence between the local estimate of survivability loss and the estimate that accounts for cascade propagation. This made it possible to detect the onset of cascade amplification earlier than with local analysis and to isolate the hidden share of service losses in the absence of direct loss of critical services. The practical value of the results lies in the applicability of the proposed method to operational parametric resource management, disruption localization, and dynamic reservation of system resources.

**Keywords:** survivability; information system; critical service; service-level representation; inter-service dependencies.

Стаття надійшла до редакції 06.01.2026.