



**В. М. Ткачов, І. В. Рубан**

*Харківський національний університет радіоелектроніки, м. Харків, Україна*

## МЕТОД ГРАФОВОГО ПРОГНОЗУВАННЯ КАСКАДНИХ ПЕРЕХОДІВ НА МІЖРІВНЕВИХ ЗАЛЕЖНОСТЯХ ІНФОРМАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ НА МОБІЛЬНІЙ ПЛАТФОРМІ З ОЦІНЮВАННЯМ КАСКАДНОГО РИЗИКУ

Встановлено, що для інформаційних систем на мобільних платформах поєднання часткової спостережуваності, переривчастості зв'язності, нерівномірної доступності ресурсів і наявності функціонально пов'язаних компонентів зумовлює розвиток індукованих порушень, які за короткий інтервал часу можуть поширюватися між рівнями даних, процесів і ресурсів та призводити до зриву виконання критичних функцій. Показано, що наявні підходи переважно орієнтовані на інтегральне оцінювання поточного стану, вибір керувальної дії або формування відновлювальних кроків, тоді як завдання побудови прогнозованої структури поширення порушень на скінченному інтервалі прогнозування залишається недостатньо опрацьованим. Тому виходом з цієї ситуації є розроблення методу графового прогнозування каскадних переходів на міжрівневих залежностях інформаційної системи на мобільній платформі з оцінюванням каскадного ризику за умов часткової спостережуваності та вікон зв'язності зі змінною тривалістю та пропускнуою здатністю. Запропоновано формалізацію графа міжрівневих залежностей, яка поєднує належність вузлів до рівнів системи, критичність вузлів, поточну активність ребер і множини допустимих шляхів досягнення вузлів. Визначено правила реалізації та поширення каскадних переходів, що враховують стан вузла-джерела, локальну вразливість вузла-приймача, параметри вікна зв'язності та допустимість реалізації переходу в поточному такті. Розроблено процедуру побудови прогнозованої структури каскадного розвитку, яка дає змогу формувати репрезентативні шляхи досягнення критичних вузлів і визначати міжрівневу глибину поширення. Удосконалено підхід до оцінювання каскадного ризику шляхом його подання як інтегральної характеристики прогнозованої структури поширення порушень з урахуванням критичності залучених вузлів, інтегральної інтенсивності та конфігурації прогнозних шляхів поширення, міжрівневої глибини поширення і моментів досягнення критичних станів. За результатами реалізації обчислювального експерименту встановлено, що запропонований метод графового прогнозування каскадних переходів з оцінюванням каскадного ризику забезпечує стабільне зменшення інтегрального каскадного ризику порівняно з локальним реагуванням без прогнозування та з підходом, який обмежується оцінюванням тільки поточного стану. Найбільший ефект виявлено за середньої та високої повноти спостереження, а також у режимах, де параметри вікон зв'язності є достатніми для підтвердження поточних залежностей і уточнення прогнозованої структури каскаду. Практичне використання запропонованого методу графового прогнозування каскадних переходів з оцінюванням каскадного ризику є доцільним як прогнозного модуля в контурі підтримки живучості, оскільки він формує випереджальну інформаційну основу для локалізації порушень, пріоритизації ресурсної підтримки та обґрунтування подальших керувальних рішень.

**Ключові слова:** живучість інформаційної системи; каскадний ризик; часткова спостережуваність; вікна зв'язності; критичні вузли; репрезентативні шляхи; переривчаста зв'язність.

### Вступ / Introduction

Інформаційні системи на мобільних платформах (ІСМП) функціонують в умовах переривчастості зв'язності компонентів системи, часткової спостережуваності стану компонентів платформи, динамічного ресурсного забезпечення обчислювальними, мережними, іншими ресурсами та характерні жорсткими часовими обмеженнями на прийняття рішень [5]. За таких умов зміна стану окремого компонента ІСМП не зберігає локальний характер, оскільки через сукупність функціональних і ресурсних залежностей порушення здатні поширювати-

ся між рівнями даних, процесів і ресурсів [14]. Це призводить до виникнення послідовностей індукованих переходів, за яких первинні порушення ініціюють вторинні порушення, а ті стають причиною появи каскадних процесів деградації ІСМП. Тобто навіть обмежене початкове порушення може перерости у каскадний розвиток порушень із втратою здатності ІСМП виконувати основну функцію у заданому інтервалі часу.

Для ІСМП визначальною інтегральною властивістю є живучість, яку доцільно трактувати як здатність зберігати та відновлювати виконання критичних функцій за ресурсної недостатності, порушень зв'язності та невиз-

© Copyright 2026 by the author(s)

Ткачов Віталій Миколайович, канд. техн. наук, доцент, докторант, кафедра електронних обчислювальних машин.

Email: vitalii.tkachov@nure.ua; <https://orcid.org/0000-0002-6524-9937>

Рубан Ігор Вікторович, д-р техн. наук, професор, кафедра електронних обчислювальних машин.

Email: rector@nure.ua; <https://orcid.org/0000-0002-4738-3286>

Цитування за ДСТУ: Ткачов В. М., Рубан І. В. Метод графового прогнозування каскадних переходів на міжрівневих залежностях інформаційної системи на мобільній платформі з оцінюванням каскадного ризику. Науковий вісник НЛТУ України. 2026, т. 36, № 2. С. 199–212.

Citation APA: Tkachov, V. M., & Ruban, I. V. (2026). Method for graph-based prediction of cascading transitions on inter-level dependencies of an information system on a mobile platform with cascading risk assessment. *Scientific Bulletin of UNFU*, 36(2), 199–212. <https://doi.org/10.36930/40360222>

наченості щодо поточного стану [9]. У межах цього наукового напрямку розроблено багаторівневі моделі живучості [15], підходи до інтегрального оцінювання стану [13], методи ризик-орієнтованого оперативного керування ресурсами [8], резервування [1], диспетчеризації критичних процесів [22], відновлення критичних сервісів у межах доступних вікон зв'язності [18].

Однак каскадні ефекти трактують як складову оцінювання поточного стану ІСМП або як чинник, що впливає на вибір керувальної дії чи режиму розподілу ресурсів [7]. Така постановка є достатньою для реагування на вже зафіксовані порушення, проте не дає змоги розглядати сам процес каскадного розвитку як окремий об'єкт прогнозування. Унаслідок цього ускладнюється завчасне виявлення шляхів поширення порушень, що можуть спричинити зрив виконання критичних функцій ІСМП. Особливо гостро ця проблема проявляється в умовах вікон зв'язності зі змінною тривалістю та пропускну здатністю, коли доступ до актуальних даних про стан компонентів ІСМП є нерівномірним, а рішення щодо стримування розвитку порушень потрібно приймати в обмежений час [6].

Для ІСМП важливо фіксувати поточний ступінь деградації окремих вузлів (компонентів, елементів), завчасно оцінювати, які саме міжрівневі залежності можуть стати каналами подальшого поширення відмов, які вузли мають найбільшу ймовірність бути залученими до каскаду, та з якою інтенсивністю каскад здатний досягати критичних сервісів, процесів і ресурсних компонентів. За відсутності такого прогнозного апарату ІСМП змушена переважно реагувати вже на наслідки порушень. Саме тому виникає потреба у розробленні методу, який на основі поточного частково спостережуваного стану та структури міжрівневих залежностей дає змогу будувати прогноз каскадних переходів на скінченному інтервалі функціонування ІСМП з можливістю кількісно оцінювати каскадний ризик як характеристику можливого розвитку порушень в інформаційній системі.

Оскільки поширення порушень в ІСМП відбувається за структурою міжрівневих залежностей між компонентами, доцільною формою подання такої структури є граф, вершини якого відповідають елементам системи, а ребра відображають можливі напрями індукованих переходів.

Отже, актуальним є завдання розроблення методу графового прогнозування каскадних переходів з оцінюванням каскадного ризику на міжрівневих залежностях ІСМП, орієнтованого на завчасне виявлення шляхів поширення з підвищеним каскадним ризиком порушень за умов часткової спостережуваності та змінних параметрів зв'язності.

*Об'єкт дослідження* – процеси розвитку порушень у багаторівневій ІСМП за переривчастою зв'язністю, часткової спостережуваності та ресурсних обмежень.

*Предмет дослідження* – методи і засоби графового прогнозування каскадних переходів, які дадуть змогу оцінювати каскадні ризики у ІСМП.

*Мета роботи* – розробити метод графового прогнозування каскадних переходів на міжрівневих залежностях ІСМП з оцінюванням каскадного ризику, який за поточним частково спостережуваним станом ІСМП, структурою міжрівневих залежностей та параметрами вікон зв'язності забезпечує побудову прогнозного розгортання порушень на скінченному інтервалі функціонування

ІСМП та кількісне оцінювання каскадного ризику для критичних сервісів, процесів і ресурсних вузлів.

Для досягнення зазначеної мети визначено такі основні завдання дослідження:

- формалізувати граф міжрівневих залежностей у формі, придатній для прогнозування каскадних переходів, що дасть змогу відображати можливі напрями поширення порушень між даними, процесами та ресурсами на скінченному інтервалі функціонування ІСМП;
- задати правила реалізації та поширення каскадних переходів між вузлами графа, що забезпечить опис умов ініціювання, індукованої передачі та накопичення каскадних впливів з урахуванням міжрівневих залежностей;
- розробити процедуру побудови прогнозованої структури каскадного розвитку з поточного стану ІСМП, що забезпечить формування прогнозованої множини вузлів і зв'язків, залучених до можливого поширення порушень у межах заданої глибини прогнозування;
- формалізувати процедуру оцінювання каскадного ризику як функції прогнозованих шляхів поширення та критичності залучених вузлів ІСМП, що забезпечить кількісне ранжування небезпечних сценаріїв розвитку порушень для підтримки оперативного керування живучістю.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** У роботі [21] розглянуто каскадні відмови в індустріальному інтернеті речей (ІІоТ) на основі моделі взаємозалежної мережі з кіберсервісним зв'язуванням, декомпозицією завдань і сервісними спільнотами. Перевагою підходу є те, що тут показано каскадне моделювання для реальних промислових сценаріїв з урахуванням горизонтального поширення в межах шару та міжшарове поширення через залежні ребра. Водночас, запропонований підхід орієнтований переважно на аналіз характеристик каскадних відмов у ІІоТ-середовищі та порівняння типів атак, але не формує прогнозу структуру розвитку порушень із поточного частково спостережуваного стану системи, не вводить окремого оцінювання каскадного ризику для критичних вузлів на скінченному інтервалі функціонування і не враховує вплив змінних вікон зв'язності на допустимість переходів.

У роботі [19] наведено результати дослідження стійкості сегментів мережі та керування ними до каскадних відмов у зв'язаній мережі. Автори запропонували модель асиметричної групової залежності, нелінійну схему навантаження та чотири стратегії перерозподілу для підвищення живучості пов'язаної мережі. Проте фокус отриманого рішення зосереджений на моделюванні каскадного процесу за заданих атак і на оцінюванні стійкості через залишок функціональних вузлів мережі.

У роботі [11] запропоновано багаторівневий граф, який одночасно описує фізичні процеси, контролери, сенсори та виконавчі механізми в межах єдиної системи. Також наведено результати дослідження, які доводять, що така структура підвищує змістову прозорість і якість виявлення аномалій у системі. Зокрема, демонструється доцільність багаторівневого графового опису саме в ІТ/ОТ-системах. Отримані результати обмежені тим, що можуть бути застосовні тільки до завдань детектування аномалій. У цій роботі автори не наводять граф досяжних каскадних переходів на скінченному інтервалі, не оцінюють каскадний ризик як характеристику структури поширення відмов.

У роботі [3] розглянуто метод просторово-часового виявлення аномалій на основі графової мережі для реконфігурованих кіберфізичних систем. Його особливістю є синергія просторових і часових залежностей у сен-

сорних даних, зменшення складності графа за рахунок формування зв'язків на основі кореляцій. Модель, яку наведено в цій роботі, орієнтовано на завчасне виявлення загроз і аномалій у часових рядах. У межах цього підходу не оцінюють ризик досягнення критичних вузлів та не розглядають завдання відбору репрезентативних траєкторій каскадного розвитку за умов обмеженої зв'язності, що робить запропоноване рішення дуже вузькоспеціалізованим.

Близьким за загальною спрямованістю є дослідження [4], у якому запропоновано підхід до кількісного оцінювання живучості комп'ютерних систем. В основу покладено поєднання марківської моделі аномалій кіберрівня з математичним описом деградації та відновлення фізичного рівня. Перевагою цього підходу є спроба пов'язати кібернетичний і фізичний рівні в межах єдиної розрахункової схеми. Результат подано у вигляді кривих живучості та узагальненого процесу деградації і відновлення. Однак у роботі не розглянуто каскадний ризик як функцію досяжності критичних вузлів на скінченному інтервалі функціонування системи.

Отже, аналіз останніх досліджень у предметній області показує, що сучасні напрями охоплюють: моделювання каскадних відмов у ПоТ, аналіз стійкості зв'язаних інформаційно-комунікаційних мереж, багаторівневі графові моделі, просторово-часове виявлення загроз та кількісне оцінювання кіберфізичної стійкості. Водночас, у цих роботах не розв'язано в єдиній постановці задачу графового прогнозування каскадних переходів на міжрівневих залежностях ІСМП з поточного частково спостережуваного стану, з урахуванням вікон зв'язності зі змінною тривалістю та пропускну здатністю, а також з оцінюванням каскадного ризику через критичність досяжних вузлів. Саме ця невирішена частина проблеми й визначає зміст дослідження цієї роботи.

**Матеріали та методи дослідження.** Матеріалами дослідження є моделі міжрівневих залежностей інформаційної системи на мобільній платформі, стани її вузлів та зв'язків, а також сценарії поширення порушень між рівнями даних, процесів і ресурсів. У роботі використано методи графового моделювання, формалізації каскадних переходів, прогнозного аналізу структури розвитку порушень і порівняльного обчислювального оцінювання каскадного ризику для заданих сценаріїв функціонування ІСМП.

## Результати досліджень та їх обговорення / Research results and their discussion

**Теоретичні засади прогнозування каскадних переходів у ІСМП.** У межах дослідження розглянуто ІСМП, у якій порушення стану окремого компонента (вузла) може індукувати зміни станів інших компонентів (вузлів) через міжрівневі залежності та зумовлювати каскадний розвиток збоїв на інтервалі функціонування ІСМП. Для формалізації структури системи використано орієнтований граф міжрівневих залежностей [15]:

$$G = \langle V, E, W \rangle, \quad (1)$$

де:  $V = V_D \cup V_P \cup V_R$  – множина вузлів рівнів даних, процесів і ресурсів;  $E$  – множина орієнтованих залежностей;  $W = \{w_{ij}\}$  – множина вагових коефіцієнтів ребер.

Подання ІСМП у вигляді (1) використовують як основу для побудови прогнозованої структури каскадних переходів. Тоді стан кожного вузла  $v_i \in V$  у момент часу  $t_k$  задають змінною:

$$x(t_k) \in \{0, 1\}, k \in K, \quad (2)$$

де значення  $x(t_k) = 0$  відповідає номінальному режиму, а  $x_i(t_k) = 1$  – критичному порушенню;  $K = \{0, 1, \dots, H\}$  – множина індексів тактів прогнозування.

Векторний опис стану ІСМП формується як:

$$\tilde{x}(t_k) = (x_i(t_k), i \in |V|)^T, \forall k \in K. \quad (3)$$

Формула (3) задає початкову конфігурацію стану ІСМП для прогнозування подальшого каскадного розвитку порушень.

Оскільки для ІСМП повне спостереження станів елементів не гарантується, вводиться маска спостережуваності:

$$m(t_k) = (m_i(t_k), i \in |V|; \forall m_i(t_k) \in \{0, 1\})^T, \forall k \in K, \quad (4)$$

де  $m_i(t_k) = 1$  означає наявність інформації про стан елемента, а  $m_i(t_k) = 0$  – її відсутність.

Оцінений стан вузла визначають за формулою:

$$\hat{x}_i(t_k) = m_i(t_k)x_i(t_k) + (1 - m_i(t_k))\tilde{x}_i(t_k), i \in |V|; \forall k \in K, \quad (5)$$

де  $\tilde{x}_i(t_k)$  – останнє узгоджене або прогнозоване значення стану вузла.

Оцінений стан вузлів, заданий значеннями  $\hat{x}_i(t_k)$  з формули (5) надалі використовують для реалізації переходів на графі залежностей.

Скінченний інтервал, на якому здійснюється прогнозування розвитку порушень, задають множиною тактів:

$$T = \{t_0, t_1, \dots, t_H\}, \quad (6)$$

де  $H$  – кількість кроків прогнозування.

Для кожного такту  $t_k \in T$  задають параметризацію вікна зв'язності:

$$\Omega(t_k) = \langle \tau_k, b_k \rangle, \quad (7)$$

де:  $\tau_k$  – тривалість доступного вікна зв'язності, с;  $b_k$  – доступна пропускна здатність, біт/с.

Параметри з виразу (7) використовують для уточнення активності міжрівневих залежностей у поточному такті. Поточне використання ребра  $e_{ij} \in E$  описується коефіцієнтом:

$$a_{ij}(t_k) = w_{ij}\chi_{ij}(t_k)\psi_{ij}(t_k), \quad (8)$$

де:  $w_{ij}$  – безрозмірна нормована характеристика сили структурного впливу вузла  $v_i$  на вузол  $v_j$ , зумовленого міжрівневою залежністю  $e_{ij}$ ;  $\chi_{ij}$  – безрозмірний нормований показник доступності реалізації залежності  $e_{ij}$  у такті  $t_k$ , що враховує обмеження вікна зв'язності за тривалістю та пропускну здатністю;  $\psi_{ij}(t_k)$  – безрозмірний нормований показник підтвердженості залежності  $e_{ij}$  наявними спостереженнями у такті  $t_k$ .

У формулі (8) враховано структурну значущість залежності, поточну доступність зв'язку та невизначеність, зумовлену неповнотою інформації.

Каскадний перехід по ребру  $e_{ij}$  вважається можливим, якщо виконується умова:

$$\hat{x}_i(t_k)a_{ij}(t_k) \geq \theta_{ij}, \quad (9)$$

де  $\theta_{ij}$  – безрозмірний пороговий параметр переходу по ребру  $e_{ij}$ , що задає мінімально необхідний рівень сукупного впливу для індукованої зміни стану вузла  $v_j$ .

Умова (9) означає, що інтенсивність порушення вузла-джерела з урахуванням сили залежності та її поточної активності є достатньою для індукованого впливу на вузол-приймач.

Оновлення оціненого стану вузла  $v_j$  на наступному такті виконують за рекурентним співвідношенням:

$$\hat{x}_j(t_{k+1}) = \max\{0, \hat{x}_j(t_k)\}; \quad (10)$$

$$\hat{x}_j(t_k) = \min\left(1, \lambda_j \hat{x}_j(t_k) + \sum_{i:(i,j) \in E} \alpha_{ij} \hat{x}_i(t_k) w_{ij} a_{ij}(t_k) + u_j(t_k)\right), \quad (10^*)$$

де:  $\lambda_j \in [0,1]$  – коефіцієнт збереження інтенсивності порушення вузла  $v_j$  між сусідніми тактами (за  $\lambda_j \approx 1$  – порушення стійке, вузол сам майже не повертається до нормального стану; за  $\lambda_j \approx 0$  – порушення швидко спадає, вузол має високу здатність до самовідновлення або швидкої локальної стабілізації);  $\alpha_{ij} \in [0,1]$  – коефіцієнт частки індукованого впливу, що передається між вузлами по ребру  $e_{ij}$ ;  $u_j(t_k)$  – зовнішня зміна нормованої інтенсивності порушення вузла  $v_j$  у такті  $t_k$  не зумовлена передаванням впливу по графу залежностей.

Оцінений стан  $\hat{x}_j(t_k)$  інтерпретується як нормована інтенсивність порушення вузла  $v_j$  у діапазоні  $[0,1]$ , де 0 відповідає відсутності порушення, а 1 – критичному порушенню.

Формула (10) задає покроковий механізм прогнозного розгортання каскаду на графі міжрівневих залежностей. Для формування прогнозу структури каскадного розвитку на кожному такті визначають множину переходів, можливих у такті  $t_k$ , а саме:

$$E^{(k)} = \{e_{ij} \in E : \hat{x}_i(t_k) w_{ij} a_{ij}(t_k) \geq \theta_{ij}\}, \quad (11)$$

тоді множину вузлів, залучених до каскаду, визначають як:

$$V^{(k+1)} = \{v_j \in V : \exists i, e_{ij} \in E^{(k)}\}. \quad (12)$$

Сукупність множин  $V^{(k+1)}$  та  $E^{(k)}$ , визначених за формулами (11), (12), утворює прогнозний граф каскадного розвитку, що відображає потенційно активну частину структури системи за поточного стану та параметрів зв'язності.

Для кількісного оцінювання прогнозованого розвитку уводиться інтегральний каскадний ризик:

$$R = \sum_{v_j \in V'} c_j \max_{t_k \in T} (\hat{x}_j(t_k) \eta_j(t_k)) + \beta_1 D_\phi + \beta_2 P_\dagger + \beta_3 T_0,$$

$$c_j \in [0,1], \eta_j(t_k) \in [0,1], D_\phi \in [0,1], P_\dagger \in [0,1], T_0 \in [0,1], \quad (13)$$

$$\beta_1 \in [0,1], \beta_2 \in [0,1], \beta_3 \in [0,1], \beta_1 + \beta_2 + \beta_3 = 1,$$

де:  $R$  – інтегральний скалярний показник каскадного ризику;  $V'$  – множина критичних вузлів;  $c_j$  – коефіцієнт критичності вузла  $v_j$ ;  $\eta_j(t_k)$  – коефіцієнт досяжності вузла у прогнозному графі;  $D_\phi$  – глибина міжрівневого поширення;  $P_\dagger$  – щільність прогнозу структури поширення;  $T_0$  – моменти досягнення критичних станів;  $\beta_1, \beta_2, \beta_3$  – коефіцієнти узгодження складових ризику.

Формула (13) враховує структуру можливого поширення каскаду та підвищений каскадний ризик його розвитку у часі. Для виділення шляхів підвищеного каскадного ризику використано ранжування прогнозних шляхів  $\pi$  за показником:

$$q(\pi) = \gamma_1 \sum_{e_{ij} \in \pi} a_{ij} + \gamma_2 \sum_{v_j \in \pi} c_j + \gamma_3 d_\phi(\pi) + \gamma_4 \frac{1}{1 + t_\pi^{end} - t_0}, \quad (14)$$

$$\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \gamma_4 \in [0,1], \gamma_1 + \gamma_2 + \gamma_3 + \gamma_4 = 1,$$

де:  $d_\phi(\pi)$  – кількість переходів між рівнями на шляху  $\pi$  (показник відображає саме міжрівневу глибину);  $t_\pi^{end}$  та  $t_0$  – номери тактів ( $t_\pi^{end}$  – номер такту досягнення останнього вузла шляху);  $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \gamma_4$  – вагові коефіцієнти.

Шлях відносять до шляхів підвищеного каскадного ризику, якщо виконується така умова:

$$q(\pi) \geq q^*, \quad (15)$$

де  $q^*$  – порогове значення показника каскадного ризику вузла шляху.

Формули (14) і (15) використовують для відсікання другорядних сценаріїв і подальшого аналізу тільки тих траєкторій каскадного розвитку, для яких характерний підвищений каскадний ризик і які створюють найбільшу загрозу критичним функціям системи.

Метод дослідження можна реалізувати як послідовність взаємопов'язаних процедур. На першому етапі формується граф міжрівневих залежностей (1) і задаються ваги ребер, пороги активації та множина критичних вузлів. На другому етапі за наявними спостереженнями та маскою (4) визначають оцінений стан системи за формулами (5), (3). На третьому етапі для кожного такту інтервалу аналізу (6) уточнюються параметри вікон зв'язності (7) і активності залежностей за формулою (8). На четвертому етапі виконують покрокове розгортання каскадних переходів за умовою (9) та рівнянням стану (10), після чого будуються множини ребер, що реалізуються, і вузлів за формулами (11), (12). На п'ятому етапі обчислюють каскадний ризик за формулою (13). На шостому етапі виконують ранжування та відбір шляхів поширення з підвищеним каскадним ризиком за формулами (14), (15).

Для перевірки методу передбачено серію обчислювальних сценаріїв, які відрізняються локалізацією первинного порушення, щільністю графа залежностей, часткою критичних вузлів, рівнем повноти спостереження та параметрами вікон зв'язності. Основними вихідними показниками є значення інтегрального каскадного ризику  $R$ , кількість досяжних критичних вузлів, глибина міжрівневого поширення, кількість шляхів підвищеного каскадного ризику та момент першого досягнення критичного стану в множині критичних вузлів.

Така схема дає змогу забезпечити відтворюваність результатів дослідження та оцінити чутливість результатів до ключових джерел невизначеності.

**Формалізація графа міжрівневих залежностей для прогнозування каскадних переходів.** Граф міжрівневих залежностей використано як базову конструкцію для побудови прогнозу картини поширення порушень на скінченному інтервалі прогнозування. На відміну від статичних описів залежностей, у яких граф фіксує тільки наявність зв'язків між компонентами, у запропонованому методі графова модель доповнюється параметрами належності вузлів до рівнів системи та коефіцієнтами критичності вузлів. Активність залежностей і умови каскадного переходу надалі визначаються окремо за поточним станом системи та параметрами зв'язності.

Приклад багаторівневого графа міжрівневих залежностей інформаційної системи на мобільній платформі для прогнозування каскадних переходів наведено на рис. 1. На цьому рисунку подано ілюстративне подання багаторівневого графа міжрівневих залежностей між даними, процесами та ресурсами, які використовують для виявлення потенційних шляхів поширення порушень і оцінювання каскадного ризику для критичних вузлів системи.

Для побудови методу використано розширене подання графа (1) у вигляді:

$$G_M = \langle V, E, L, C, W \rangle, \quad (16)$$

де:  $L$  – множина рівнів системи;  $C = \{c_i\}$  – множина коефіцієнтів критичності вузлів шляху.

Множину рівнів ІСМП задають як:

$$L = \{L_D, L_P, L_R\}, \quad (17)$$

де:  $L_D$  – рівень даних;  $L_P$  – рівень процесів;  $L_R$  – рівень ресурсів.

Для кожного вузла  $v_i \in V$  вводиться функція рівневої належності, що визначає, до якого з трьох рівнів належить вузол:

$$\ell(v_i): V \rightarrow L. \quad (18)$$

Відображення (18) використовують надалі для фіксації міжрівневого характеру переходів і для обчислення глибини поширення каскаду.

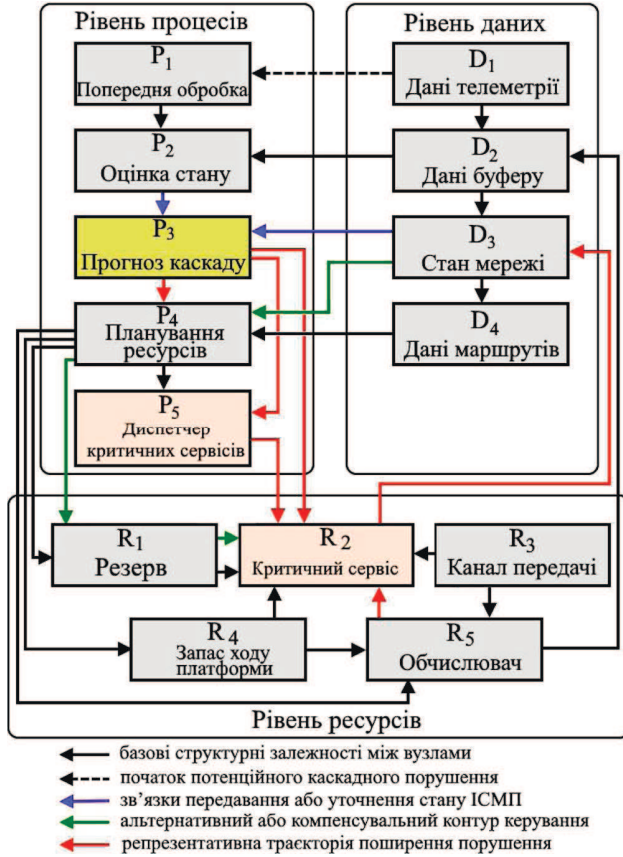


Рис. 1. Багаторівневий граф міжрівневих залежностей інформаційної системи на мобільній платформі для прогнозування каскадних переходів / Multilevel graph of interlevel dependencies of the information system on a mobile platform for predicting cascade transitions

Кожному вузлу  $v_i \in V$  ставлять у відповідність коефіцієнт критичності  $c_i$ , що відображає значущість вузла для збереження критичних функцій системи. На цій основі множина критичних вузлів визначається співвідношенням:

$$V' = \{v_i \in V : c_i \geq c^*\}, \quad (19)$$

де  $c^*$  – порогове значення критичності.

Формула (19) дає змогу виділити вузли, досягнення яких каскадним розвитком є критичним з погляду живучості ІСМП, від вузлів допоміжного або периферійного характеру. Для матричного подання поточної активності міжвузлових залежностей, визначеної за формулою (8), вводиться матриця поточних залежностей:

$$A(t_k) = [a_{ij}(t_k)]_{|V| \times |V|}. \quad (20)$$

Матриця (20) фіксує факт наявності залежності та поточну інтенсивність прогнозованого впливу в такті  $t_k$ :

- якщо  $a_{ij}(t_k) = 0$ , то ребро не бере участі у формуванні каскадного переходу;

- якщо  $a_{ij}(t_k) > 0$ , то ребро розглядають як потенційний канал поширення порушення.

З огляду на часткову спостережуваність і змінні параметри зв'язності в кожному такті аналізу формується активний підграф міжрівневих залежностей

$$G_M^{(k)} = \langle V^{(k)}, E^{(k)} \rangle, \quad (21)$$

де:  $V^{(k)} \subseteq V$  – множина вузлів, для яких на такті  $t_k$  доступні спостережувані або оцінені стан;  $E^{(k)} \subseteq E$  – множина ребер, що мають ненульову активність у матриці (20).

Отже, підграф (21) відображає ту частину структури ІСМП, що в межах поточного такту реально може брати участь у розвитку каскаду.

Для кожного вузла  $v_i$  вводиться множина його вхідних вузлів:

$$N_i^- = \{v_j \in V : (v_j, v_i) \in E\} \quad (22)$$

та множина вихідних вузлів:

$$N_i^+ = \{v_m \in V : (v_i, v_m) \in E\}. \quad (23)$$

Множини (22) та (23) використовують для ідентифікації каналів індукованого впливу та покрокового розгортання каскадних переходів від вузлів-джерел до вузлів-приймачів. У межах запропонованого методу особливий інтерес становлять вузли з великою кількістю вхідних та вихідних зв'язків, оскільки вони можуть виконувати роль вузлів акумулювання або розгалуження каскадного поширення.

Щоб формально відокремити внутрішньорівневі та міжрівневі переходи, вводиться індикатор зміни рівня на ребрі як потенційному каналі поширення порушення

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 1, & \ell(v_i) \neq \ell(v_j), \\ 0, & \ell(v_i) = \ell(v_j). \end{cases} \quad (24)$$

Індикатор  $\delta_{ij}$  (24) є важливим для подальшого оцінювання структури каскаду, оскільки саме міжрівневі переходи визначають вихід порушення за межі локального функціонального контура і його поширення на суміжні шари ІСМП.

Оскільки прогнозування виконують на скінченному інтервалі, то для вузла  $v_j$  задають множину допустимих шляхів його каскадного досягнення:

$$\Pi_j^H = \left\{ \pi = \left( \sum_{k=0}^s v_{i_k} = v_j \right) : \begin{matrix} s \leq H, \\ (v_{i_{r-1}}, v_{i_r}) \in E, r = \overline{1, s} \\ a_{i_{r-1}i_r}(t_r) > 0, \end{matrix} \right\}, \quad (25)$$

де  $H$  – кількість кроків прогнозування.

Множина  $\Pi_j^H$  з виразу (25) містить усі шляхи, якими вузол  $v_j$  може бути досягнутий каскадом за не більше ніж  $H$  кроків за умови ненульової активності всіх ребер на шляху. Саме використання множини  $\Pi_j^H$  є принциповим для переходу від статичного опису залежностей до прогнозної структури можливого розвитку порушень.

Для подальшого аналізу каскадного поширення доцільно також ввести узагальнену оцінку міжрівневої глибини шляху:

$$d_\varphi(\pi) = \sum_{r=1}^s \delta_{i_{r-1}i_r}, \quad (26)$$

де  $d_\varphi(\pi)$  показує кількість переходів між різними рівнями на шляху  $\pi$ .

Оцінка з формули (26) дає змогу відрізняти локальні шляхи внутрішньорівневого поширення від тих траєк-

торій, які залучають до каскаду кілька рівнів системи і тому пов'язані з вищим каскадним ризиком для живучості ІСМП.

Отже, конструкції (16)–(26) задають формалізацію графа міжрівневих залежностей, яка становить основу для подальшого визначення правил активації та поширення каскадних переходів. Запропонована формалізація поєднує належність вузлів до рівнів системи, критичність вузлів, поточну активність ребер і множини допустимих шляхів досягнення вузлів на інтервалі прогнозування. Це дає змогу перейти від структурного опису ІСМП до побудови прогнозованої структури каскадного розвитку.

**Правила реалізації та поширення каскадних переходів між вузлами графа.** Після формалізації графа міжрівневих залежностей  $G_M$  з виразу (16) наступним етапом є задавання правил, за якими локальне порушення ініціює прогнозований каскадний розвиток. У межах запропонованого методу такий перехід визначають сукупною дією поточного стану вузла-джерела, поточної активності залежності, що формується з урахуванням параметрів вікна зв'язності, та локальної вразливості вузла-приймача. Саме поєднання цих чинників дає змогу відокремити формально наявний зв'язок від каналу поширення порушення, який може бути реалізований у поточному такті.

На такті  $t_k$  множину вузлів-джерел каскадного поширення визначають як:

$$V^{\wedge}(t_k) = \{v_i \in V : \hat{x}_i(t_k) \geq \theta_i^{\wedge}\}, \quad (27)$$

де  $\theta_i^{\wedge}$  – поріг активації вузла  $v_i$ .

Множина (27) містить вузли, поточний стан яких є достатнім для індукованого впливу на суміжні вузли. Отже, не кожен порушений вузол бере участь у поширенні каскаду, а тільки той, для якого нормована інтенсивність порушення поширення перевищує локальний поріг активації. Для кожного потенційного переходу  $e_{ij} \in E$ , де  $v_i \in V^{\wedge}(t_k)$ , вводиться інтенсивність індукованого переходу:

$$z_{ij}(t_k) = \hat{x}_i(t_k) a_{ij}(t_k) \zeta_j(t_k), \quad (28)$$

де  $\zeta_j(t_k)$  – коефіцієнт чутливості вузла-приймача  $v_j$  до індукованого впливу в такті  $t_k$ .

Для формалізації локальної вразливості вузла-приймача використано його залишковий запас до критичного стану. Якщо  $\theta_j$  – критичний поріг вузла  $v_j$ ,  $\theta_j \in (0, 1]$ , то:

$$\zeta_j(t_k) = 1 - \frac{\max\{0, \theta_j - \hat{x}_j(t_k)\}}{\theta_j}, \quad \forall \zeta_j(t_k) \in [0, 1]. \quad (29)$$

Співвідношення  $\zeta_j(t_k)$  (29) означає, що вузол, який уже наблизився до критичного стану, є вразливішим до індукованого впливу, ніж вузол із великим запасом до критичного порогу. Отже, інтенсивність індукованого переходу  $z_{ij}(t_k)$  з виразу (28) враховує одночасно стан вузла-джерела, силу залежності та локальну вразливість вузла-приймача.

Однак, навіть за наявності достатньої інтенсивності індукованого переходу, не кожен перехід є допустимим у поточному такті. Для цього вводиться індикатор допустимості переходу:

$$\phi_{ij}(t_k) = \begin{cases} 1, & \tau_k \geq \tau_{ij}^{\min} \wedge b_k \geq b_{ij}^{\min} \wedge a_{ij}(t_k) > 0, \\ 0, & \text{інакше,} \end{cases} \quad (30)$$

де:  $\tau_k$  і  $b_k$  задають параметрами вікна зв'язності  $\Omega(t_k)$  з виразу (7);  $\tau_{ij}^{\min}$  – мінімальна тривалість вікна, достатня для реалізації впливу по ребру  $e_{ij}$ ;  $b_{ij}^{\min}$  – мінімальна пропускна здатність для підтвердження та поширення відповідного переходу.

Індикатор з виразу (30) дає змогу врахувати, що частина структурно наявних залежностей у конкретному такті не може брати участі в каскаді через часові та комунікаційні обмеження.

Потенційний каскадний перехід вважається таким, що реалізується, якщо виконується умова:

$$z_{ij}(t_k) \phi_{ij}(t_k) \geq \theta_{ij}. \quad (31)$$

На основі умови (31) вводиться бінарний індикатор реалізації переходу:

$$b_{ij}(t_k) = \begin{cases} 1, & z_{ij}(t_k) \phi_{ij}(t_k) \geq \theta_{ij}, \\ 0, & z_{ij}(t_k) \phi_{ij}(t_k) < \theta_{ij}. \end{cases} \quad (32)$$

Індикатор (32) відокремлює потенційно можливі переходи від тих, що містяться до прогнозованої структури каскадного розвитку. У такий спосіб прогнозна структура формується шляхом вибіркового внесення тільки тих залежностей, для яких одночасно виконуються умови щодо стану вузла-джерела, локальної вразливості вузла-приймача та темпорально-комунікаційної допустимості переходу.

Для вузла  $v_j$  сукупний індукований вплив на такті  $t_k$  обчислюють як:

$$y_j(t_k) = \sum_{v_i \in N_j} b_{ij}(t_k) a_{ij} z_{ij}(t_k). \quad (33)$$

Величина  $y_j(t_k)$  з (33) акумулює одночасний вплив від усіх переходів, що реалізуються, на вузол  $v_j$ . Це важливо, оскільки в багаторівневій системі каскадний перехід часто зумовлюється суперпозицією кількох помірних впливів, що одночасно досягають вузла-приймача.

Приріст порушення вузла  $v_j$ , зумовлений саме каскадним поширенням, визначають як:

$$\Delta x_j^{\wedge}(t_k) = \min\{1 - \hat{x}_j(t_k), y_j(t_k)\}. \quad (34)$$

Обмеження у виразі (34) забезпечує, що стан вузла не перевищує верхню межу одиничного нормування. Така форма приросту враховує залишковий запас вузла та не допускає виходу оціненого стану за межі інтервалу  $[0, 1]$ .

Прогнозований стан вузла на наступному такті з урахуванням каскадно індукованого приросту визначають співвідношенням:

$$\hat{x}_j(t_{k+1}) = \max\{0, \min[1, \lambda_j \hat{x}_j(t_k) + \Delta x_j^{\wedge}(t_k) + u_j(t_k)]\}. \quad (35)$$

У виразі (35) інерційна складова враховує накопичення вже наявного порушення,  $\Delta x_j^{\wedge}(t_k)$  – каскадно індукований приріст, а  $u_j(t_k)$  – зовнішній або відновлювальний вплив. Таке подання дає змогу розрізняти власну динаміку вузла та динаміку, спричинену поширенням каскаду.

Вузол  $v_j$  вважається вперше залученим до каскаду на такті  $t_{k+1}$ , якщо виконується умова:

$$\hat{x}_j(t_{k+1}) - \hat{x}_j(t_k) \geq \varepsilon_x, \quad (36)$$

де  $\varepsilon_x > 0$  – мінімально значущий приріст нормованої інтенсивності порушення.

На основі умови (36) формується множина вперше залучених вузлів:

$$V^{\text{new}}(t_{k+1}) = \{v_j \in V : \hat{x}_j(t_{k+1}) - \hat{x}_j(t_k) \geq \varepsilon_x\}. \quad (37)$$

Множину  $V^{new}(t_{k+1})$  з (37) використовують для покрокового розгортання прогнозного графа каскадного розвитку. Якщо вузол не задовольняє умову (36), то його зміна стану вважається недостатньою для внесення до множини вузлів, вперше залучених до каскаду на поточному кроці.

Для відокремлення внутрішньорівневого та міжрівневого поширення вводиться множина міжрівневих переходів, що реалізуються:

$$E^{inter}(t_k) = \{e_{ij} \in E : b_{ij}(t_k) = 1 \wedge \delta_{ij} = 1\}, \quad (38)$$

де  $\delta_{ij}$  задають індикатором зміни рівня (24).

Множина  $E^{inter}(t_k)$  з виразу (38) відображає ті переходи, що переводять порушення з одного рівня ІСМП на інший. Саме такі переходи є критичними для формування багаторівневого каскаду, оскільки вони виводять порушення за межі локального функціонального контура.

Щоб зафіксувати відносний приріст каскаду на поточному такті, вводиться коефіцієнт каскадного приросту:

$$\kappa(t_k) = \frac{|V^{new}(t_{k+1})|}{1 + |V^\uparrow(t_k)|}. \quad (39)$$

Коефіцієнт  $\kappa(t_k)$  з (39) показує, скільки нових вузлів залучають до каскаду відносно кількості активних вузлів-джерел на поточному такті:

- якщо  $\kappa(t_k) > 1$ , то каскад розширюється;
- якщо  $\kappa(t_k) < 1$ , то поширення каскаду сповільнюється.

Процес покрокового поширення продовжується доки, доки виконується умова:

$$|V^{new}(t_{k+1})| > 0 \wedge k < H, \quad (40)$$

де  $H$  – кількість кроків прогнозування, задана множиною  $T$  у виразі (6).

Умова (40) визначає критерій завершення прогнозного розгортання каскаду: або каскад перестає залучати нові вузли, або досягається межа інтервалу прогнозування.

Отже, правила активації та поширення каскадних переходів задаються послідовністю конструкцій (27)–(30), умовою реалізації переходу (31), індикатором реалізації (32), сукупним індукованим впливом (33), приростом порушення (34), прогнозованим станом вузла (35), множиною вузлів, вперше залучених до каскаду (37), множиною міжрівневих переходів, що реалізуються (38), коефіцієнтом каскадного приросту (39) та умовою завершення процесу (40).

На відміну від статичних схем суміжності, запропонована система правил дає змогу формувати прогнозну структуру каскадного розвитку з урахуванням поточного стану ІСМП, обмежень зв'язності та накопичення порушень у вузлах-приймачах.

**Процедура побудови прогновної структури каскадного розвитку з поточного стану системи.** Наступним етапом є побудова прогновної структури каскадного розвитку з поточного частково спостережуваного стану ІСМП. У межах запропонованого методу така структура формується як покрокове розгортання тільки тих переходів, які є допустимими та такими, що реалізуються, на скінченному інтервалі прогнозування. Це дає змогу зберегти змістову прозорість результату та водночас уникнути надмірного зростання кількості дургорядних сценаріїв.

Початкову множину прогнозного розгортання утворюють вузли-джерела каскадного поширення, визначені

ні множиною  $V^\uparrow(t_0)$  (27). Для подальшого викладу вводиться початкова множина поширення:

$$S^{(0)} = V^\uparrow(t_0). \quad (41)$$

Множина  $S^{(0)}$  задає початкову конфігурацію каскаду, тобто ті вузли, стан яких на момент  $t_0$  уже є достатнім для індукованого впливу на суміжні компоненти. Від вузлів множини  $S^{(0)}$  починається побудова прогновної структури на інтервалі  $T$  з виразу (6).

На кожному наступному кроці розгортання формується наступна множина поширення, до якої містяться тільки ті вузли, що вперше залучаються до каскаду на поточному такті. Для цього вводиться рекурентне співвідношення:

$$S^{(k+1)} = \frac{V^{new}(t_{k+1})}{\bigcup_{r=0}^k S^{(r)}}, \quad k = \overline{0, H-1}, \quad (42)$$

Подання  $S^{(k+1)}$  (42) усуває повторне внесення вузлів, які вже були внесені до прогновної структури на попередніх тактах, і цим самим забезпечує пошарову побудову прогнозу. У такій побудові кожен вузол входить до прогновної структури тільки один раз – у тому шарі, на якому його стан уперше задовольняє умову значущого приросту (36).

Множину ребер, за якими реалізуються переходи між сусідніми шарами прогнозного розгортання, визначають як:

$$E_\xi^{(k)} = \{e_{ij} \in E : v_i \in S^{(k)}, v_j \in S^{(k+1)}, b_{ij}(t_k) = 1\}, \quad \xi \in \Xi, \quad (43)$$

де  $\Xi$  – множина індексів прогнозних структур каскадного розвитку.

Множина  $E_\xi^{(k)}$  містить тільки ті ребра, які фактично забезпечили перехід від шару  $S^{(k)}$  до шару  $S^{(k+1)}$  за правилами активації (31), (32). Це дає змогу безпосередньо відокремити прогнозну структуру каскадного розвитку від повної топології міжрівневих залежностей.

Сукупність усіх шарів прогнозного розгортання та ребер, за якими реалізуються переходи на інтервалі прогнозування, утворює прогнозну структуру каскадного розвитку:

$$G_\xi = \langle V_\xi, E_\xi \rangle, \quad V_\xi = \bigcup_{k=0}^H S^{(k)}, \quad E_\xi = \bigcup_{k=0}^{H-1} E_\xi^{(k)}. \quad (44)$$

Подання  $G_\xi$  є основним результатом цього етапу формування прогновної структури, оскільки саме воно відображає ту частину системи, яка за поточного стану, активності залежностей і параметрів зв'язності може бути залучена до каскаду в межах інтервалу прогнозування. Маємо, що, на відміну від базового графа  $G_M$  (16), структура  $G_\xi$  (44) є прогнозною.

Для кожного вузла  $v_j \in V_\xi$  доцільно зафіксувати момент його першого досягнення каскадом. Для цього вводиться функція часу досягнення:

$$t_j^* = \min \{t_k \in T : v_j \in S^{(k)}\}. \quad (45)$$

Момент  $t_j^*$  дає змогу впорядкувати вузли за фактом залучення до каскаду та за черговістю їх досягнення. Це є важливим для подальшого оцінювання каскадного ризику, оскільки досягнення критичного вузла на початкових тактах прогнозування пов'язане з вищим каскадним ризиком, ніж його досягнення наприкінці інтервалу прогнозування.

Окрім часу досягнення, для вузла  $v_j$  вводиться узагальнена міра досяжності у прогнозній структурі:

$$\eta_j = 1 - \prod_{\pi \in \Pi_j^\xi} (1 - \mu(\pi)), \quad (46)$$

де:  $\Pi_j^\xi \subseteq \Pi_j^H$  – множина шляхів до вузла  $v_j$ , внесених до прогнозної структури каскадного розвитку;  $\mu(\pi)$  – вагова інтенсивність шляху  $\pi$ , яку подають як:

$$\mu(\pi) = \prod_{e_{ij} \in \pi} a_{ij}(t_{k_{ij}}) \alpha_{ij}. \quad (47)$$

Величина  $\eta_j$  є узагальненою мірою досяжності вузла у прогнозній структурі та зростає зі збільшенням кількості шляхів до вузла і їх інтегральної сили. Подання  $\mu(\pi)$  (47) через добуток активностей ребер і коефіцієнтів передачі впливу дає змогу зберегти змістову прозорість шляху як послідовності узгоджених каскадних переходів. Якщо до вузла веде кілька шляхів, його значення  $\eta_j$  (46) наближається до одиниці; якщо ж шляхів немає, то  $\eta_j$  прямує до нуля.

Оскільки прямий облік усіх шляхів, внесених до прогнозної структури, може призводити до надмірного зростання обчислювальної складності, у процедурі побудови прогнозної структури застосовується правило пріоритетності шляхів [16]. Нехай два шляхи  $\pi_a$  і  $\pi_b$  завершуються в одному й тому самому вузлі  $v_j$ . Тоді шлях  $\pi_a$  вважається пріоритетним відносно шляху  $\pi_b$ , якщо виконується умова:

$$t_{\pi_a}^{end} \leq t_{\pi_b}^{end} \wedge \mu(\pi_a) \geq \mu(\pi_b) \wedge d_\phi(\pi_a) \leq d_\phi(\pi_b), \quad (48)$$

де  $t_{\pi}^{end}$  – момент досягнення (такт) кінцевого вузла шляху.

Умова пріоритетності (48) означає, що шлях  $\pi_a$  є не пізнішим, не слабшим і не більш міжрівнево складним, ніж шлях  $\pi_b$ . У такому разі шлях  $\pi_b$  вважається другорядним і може бути вилучений із подальшого аналізу без втрати ключової прогнозної інформації.

З урахуванням правила пріоритетності (48) для кожного вузла формується скорочена множина репрезентативних шляхів

$$\Pi_j^\xi = \left\{ \pi \in \Pi_j^\xi : \nexists \pi' \in \Pi_j^\xi, \pi' \succ \pi \right\}, \quad (49)$$

де  $\pi' \succ \pi$  означає пріоритетність шляху  $\pi'$  відносно шляху  $\pi$  за критерієм (48).

Множина  $\Pi_j^\xi$  дає змогу зберегти тільки ті траєкторії каскадного досягнення вузла, які є інформативними для подальшого оцінювання каскадного ризику. На основі множин  $\Pi_j^\xi$  доцільно виконувати подальше виділення шляхів підвищеного каскадного ризику, не перевантажуючи процедуру надлишковими варіантами.

Для характеристики прогнозної структури загалом вводиться її відносний розмір на інтервалі прогнозування:

$$\sigma_\xi = \frac{|V_\xi| + |E_\xi|}{|V| + |E|}, \xi \in \Xi. \quad (50)$$

Коефіцієнт  $\sigma_\xi$  відображає, яка частка вузлів і ребер базового графа  $G_M$  (16) фактично входить до прогнозної структури каскадного розвитку. Невелике значення  $\sigma_\xi$  свідчить про локалізований розвиток порушення, тоді як його зростання означає розширення каскаду на значну частину міжрівневої структури ІСМП.

Побудова прогнозної структури завершується, якщо виконується умова:

$$S^{(k+1)} = \emptyset \vee k = H. \quad (51)$$

Ця умова означає, що або каскад припиняє залучати нові вузли, або досягається межа інтервалу прогнозу-

вання. У першому випадку формується завершений прогноз локалізованого каскаду, у другому – побудова прогнозу припиняється на скінченному інтервалі прогнозування, що відповідає реальним часовим обмеженням оперативного керування.

Отже, процедуру побудови прогнозної структури каскадного розвитку задають початковою множиною поширення (41), рекурентним формуванням шарів (42), побудовою множини ребер, за якими реалізуються переходи (43), утворенням прогнозного графа (44), визначенням часу досягнення вузлів (45), оцінюванням їх досяжності (46) з використанням інтенсивності шляхів (47), скороченням надлишкових сценаріїв за правилом пріоритетності (48), формуванням репрезентативних множин шляхів (49), обчисленням відносного розміру прогнозної структури (50) та умовою завершення побудови (51).

У такій формі результатом є перелік вузлів, залучених до каскаду, та впорядкована прогнозна структура, придатна для подальшого оцінювання каскадного ризику.

**Оцінювання каскадного ризику за прогнозованими шляхами поширення та критичністю залучених вузлів.** Побудована прогнозна структура каскадного розвитку  $G_\xi$  (44) дає змогу перейти від опису можливих переходів до кількісного оцінювання каскадного ризику, пов'язаного з їх реалізацією для критичних функцій ІСМП. У межах запропонованого методу каскадний ризик розглядають як узагальнену оцінку прогнозованого розвитку порушень, що формується під впливом трьох груп чинників: критичності залучених вузлів, конфігурації та інтегральної інтенсивності прогнозних шляхів поширення, часу досягнення критичних станів на скінченному інтервалі прогнозування. Така постановка дає змогу пов'язати ризик з фактом деградації та з прогнозованою структурою її подальшого розгортання.

Для кожного вузла  $v_j$  вводиться вузловий каскадний ризик як функція його критичності, досяжності у прогнозній структурі та наближення до критичного стану:

$$r_j = c_j n_j \max_{t_k \in T} \frac{\hat{x}_j(t_k)}{\theta_j}, j \in J, \quad (52)$$

де:  $c_j$  – коефіцієнт критичності вузла;  $n_j$  – узагальнена міра досяжності, що визначають співвідношенням (46);  $\theta_j \in (0, 1]$  – критичний поріг вузла  $v_j$ ;  $J = \{1, 2, \dots, |V|\}$  – множина індексів вузлів графа.

Величина  $r_j$  зростає зі збільшенням критичності вузла, його досяжності у прогнозній структурі та наближення прогнозованого стану до критичного порогу. Якщо вузол не є досяжним у прогнозній структурі, то  $n_j = 0$ , і його внесок у каскадний ризик зникає незалежно від величини  $c_j$ .

Оскільки важливим є факт досягнення вузла каскадом та момент цього досягнення, вводиться коефіцієнт, що враховує момент досягнення вузла каскадом:

$$o_j = \frac{1}{1 + t_j^* - t_0}. \quad (53)$$

Величина  $o_j$  набуває більших значень для вузлів, яких каскад досягає на початкових тактах прогнозування. Це дає змогу розрізняти вузли, що входять до прогнозної структури на початку інтервалу прогнозування, і вузли, які залучаються пізніше, коли залишковий час для розвитку каскаду вже є меншим.

З урахуванням часу досягнення визначають скоригований вузловий ризик:

$$\tilde{r}_j = r_j \circ_j, j \in J. \quad (54)$$

Подання (54) підсилює внесок тих вузлів, для яких поєднуються висока критичність, значна досяжність та залучення до каскаду на початкових тактах. Саме такі вузли пов'язані з вищим каскадним ризиком з погляду зриву критичних функцій системи на обмеженому інтервалі часу.

Окрім вузлового ризику, доцільно окремо оцінювати ризикову значущість прогнозованих шляхів поширення. Для кожного репрезентативного шляху  $\pi \in \Pi_j^\zeta$  визначають його ризикову вагу за формулою:

$$r(\pi) = \mu(\pi) \left( \sum_{v_s \in \pi} c_s \right) \left( 1 + \frac{d_\varphi(\pi)}{1 + |\pi|} \right), \quad (55)$$

де  $|\pi|$  – кількість ребер на шляху.

У виразі (55) перший множник відображає інтегральну інтенсивність шляху, другий – сумарну критичність вузлів, через які проходить каскад, а третій – нормовану міжрівневу глибину шляху. Остання складова підвищує вагу тих шляхів, які переводять порушення через кілька рівнів ІСМП і тому пов'язані з вищим каскадним ризиком для її живучості.

Для кожного критичного вузла  $v_j \in V' \cap V_\xi$  шляховий ризик його досягнення визначають як максимум серед репрезентативних шляхів:

$$r_j^g = \max_{\pi \in \Pi_j^\zeta} r(\pi), j \in J. \quad (56)$$

Величина  $r_j^g$  характеризує найбільш ризиково значущий сценарій досягнення критичного вузла  $v_j$ . Використання максимального значення є доцільним, оскільки для підтримання живучості визначальним є шлях поширення, який формує найбільший каскадний ризик для наявних критичних функцій. Узагальнений ризик досягнення критичних вузлів прогнозованим каскадом визначають як:

$$R' = \sum_{v_j \in V' \cap V_\xi} (\omega_1 \tilde{r}_j + \omega_2 r_j^g), \quad (57)$$

де  $\omega_1, \omega_2 \geq 0$ ,  $\omega_1 + \omega_2 = 1$  – коефіцієнти узгодження вузлової та шляхової складових.

Формула (57) поєднує дві складові каскадного ризику: індивідуальний ризик критичних вузлів та ризик траєкторій, якими ці вузли можуть бути досягнуті.

Однак каскадний ризик формується як через досягнення критичних вузлів, так і через щільність прогнозованої структури поширення. Тому додатково вводиться коефіцієнт щільності прогнозного поширення:

$$P_\dagger^\xi = \frac{|E_\xi|}{|E|}. \quad (58)$$

Величина  $P_\dagger^\xi$  відображає, яка частка всіх структурно можливих залежностей фактично входить до прогнозованої структури каскадного розвитку. Зростання цієї частки свідчить про розширення області потенційного охоплення ІСМП каскадним поширенням.

Для оцінювання міжрівневої глибини прогнозованого каскаду вводиться показник глибини прогнозованого поширення:

$$D_\xi = \max_{\pi \in \Pi^\zeta} d_\varphi(\pi), \Pi^\zeta = \bigcup_{v_j \in V_\xi} \Pi_j^\zeta. \quad (59)$$

Глибина  $D_\xi$  фіксує максимальну кількість переходів між рівнями на будь-якому репрезентативному шляху прогнозованої структури. Якщо  $D_\xi = 0$ , поширення зали-

шається внутрішньорівневим; зростання  $D_\xi$  означає залучення до каскаду нових рівнів ІСМП.

Ще однією характеристикою є середній коефіцієнт каскадного приросту на інтервалі прогнозування. Для цього використовують таке усереднення:

$$\bar{\kappa} = \frac{1}{H} \sum_{k=0}^{H-1} \kappa(t_k). \quad (60)$$

Величина  $\bar{\kappa}$  відображає здатність каскаду породжувати нові залучені вузли впродовж усього інтервалу прогнозування. Збільшення  $\bar{\kappa}$  свідчить про збереження високої інтенсивності залучення нових вузлів до каскаду впродовж інтервалу прогнозування, зокрема за змінних параметрів зв'язності.

Загалом середній коефіцієнт каскадного приросту (середній темп зростання/зміни) на інтервалі прогнозування є ключовою характеристикою для аналізу динаміки процесів, що розвиваються ланцюгово (каскадно), де кожен наступний етап залежить від попереднього. Це геометричне середнє значення темпів приросту за окремі періоди (кроки) прогнозу. Він показує, у скільки разів у середньому змінюється величина на кожному кроці прогнозування.

З урахуванням вузлової, шляхової, структурної та динамічної складових інтегральний каскадний ризик, який загальною подано у (13), конкретизується для запропонованого методу у вигляді:

$$R_\cdot = \beta_1 R' + \beta_2 P_\dagger^\xi + \beta_3 \frac{D_\xi}{D^{\max}} + \beta_4 \bar{\kappa}, \quad (61)$$

де:  $\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4 \geq 0$ ;  $\beta_1 + \beta_2 + \beta_3 + \beta_4 = 1$ ;  $D^{\max}$  – максимальна можлива міжрівнева глибина прогнозованого поширення для графа  $G_M$  з виразу (16).

Формула (61) відрізняється від суто вузлового оцінювання тим, що враховує ризик досягнення вже залучених критичних компонентів, масштаб поширення, багаторівневості та динаміку розвитку прогнозованого каскаду.

У формулах (14) і (15) було задано загальний вигляд показника ризикової значущості прогнозного шляху, який використовують на етапі первинного відсікання другорядних сценаріїв каскадного розвитку. У цьому підрозділі зазначений загальний критерій конкретизується для задачі оцінювання каскадного ризику через введення шляхового ризику (55), ризику досягнення критичного вузла (56) та інтегрального каскадного ризику (61). Отже, співвідношення (14) і (15) задають загальну логіку відбору ризиково значущих траєкторій, а формули (55)–(64) визначають її деталізоване ризикорієнтоване подання в межах запропонованого методу.

Для змістової прозорості отриманих значень доцільно ввести класи каскадного ризику. Нехай  $R_\cdot \in [0, 1]$ . Тоді рівень каскадної каскадного ризику визначають як:

$$\Lambda(R_\cdot) = \begin{cases} \text{низький,} & 0 \leq R_\cdot < \rho_1, \\ \text{помірний,} & \rho_1 \leq R_\cdot < \rho_2, \\ \text{підвищений,} & \rho_2 \leq R_\cdot < \rho_3, \\ \text{високий,} & \rho_3 \leq R_\cdot \leq 1, \end{cases} \quad (62)$$

де  $\rho_1, \rho_2, \rho_3$  – порогові значення класифікації каскадного ризику;  $0 < \rho_1 < \rho_2 < \rho_3 < 1$ .

Подання  $\Lambda(R_\cdot)$  потрібне для переходу від безрозмірної числової оцінки до рівня каскадного ризику, придатного для подальшого використання у контурі підтримання живучості ІСМП.

Окремо потрібно ввести правило виділення найбільш ризиково значущих вузлів і шляхів прогнозової структури. Вузол  $v_i \in V_\zeta$  вважається ризиково значущим, якщо:

$$\tilde{r}_j \geq \nu_v R_\zeta, \quad (63)$$

де  $\nu_v \in (0,1)$  – поріг відносного внеску вузла у загальний ризик.

Аналогічно шлях  $\pi \in \Pi_\zeta$  вважається ризиково значущим, якщо:

$$r(\pi) \geq \nu_\pi \max_{\pi'' \in \Pi_\zeta} r(\pi''), \quad (64)$$

де  $\nu_\pi \in (0,1]$  – поріг виділення ризиково значущих шляхів. Умови (63) і (64) дають змогу перейти від інтегральної оцінки  $R_\zeta$  з (61) до конкретного набору вузлів і траєкторій, що формують основну частину каскадного ризику. Саме цей набір є найбільш інформативним для подальшого обґрунтування рішень щодо локалізації поширення порушень.

Отже, оцінювання каскадного ризику в межах запропонованого методу ґрунтується на послідовному визначенні вузлового ризику (52), коефіцієнта, що враховує момент досягнення вузла каскадом (53), скоригованого вузлового ризику (54), ризикової ваги шляху (55), шляхового ризику критичного вузла (56), узагальненого ризику досягнення критичних вузлів (57), щільності прогнозової структури поширення (58), глибини прогнозованого поширення (59), середнього коефіцієнта каскадного приросту (60) та інтегрального каскадного ризику (61). На відміну від підходів, у яких ризик пов'язується тільки з поточним рівнем деградації або з окремою ймовірністю відмови, запропонована схема дає змогу оцінити каскадний ризик прогнозованої структури поширення порушень на міжрівневих залежностях.

**Дослідження роботи методу за часткової спостережуваності і вікон зв'язності зі змінною тривалістю та пропускну здатністю.** Працездатність запропонованого методу перевірено на серії обчислювальних сценаріїв, у яких варіювали повноту спостереження, параметри вікон зв'язності та часову зміну їх характеристик. Як порівняльні режими використано локальне реагування без прогнозування та оцінювання тільки поточного стану. Основну увагу зосереджено на зміні інтегрального каскадного ризику  $R_\zeta$  з (61), відносній

перевазі запропонованого методу та динаміці охоплення критичних вузлів.

На рис. 2 подано результати першої серії експериментів, у якій досліджено залежність каскадного ризику від повноти спостереження. У всьому розглянутому діапазоні часток спостереження запропонований метод забезпечує найменші значення  $R_\zeta$  порівняно з двома базовими підходами. Для всіх трьох режимів зі зростанням повноти спостереження ризик зменшується, проте для запропонованого методу це зменшення є вираженішим. Водночас, праві шкали на рис. 2 показують, що відносна перевага запропонованого методу зростає разом із підвищенням доступності інформації про стан ІСМП, а найбільший практичний ефект відбувається вже за середньої повноти спостереження. Це означає, що метод не потребує повної спостережуваності та здатний ефективно перетворювати навіть частково доступні спостереження на точнішу прогнозову структуру каскадного розвитку.

На рис. 3 наведено карту відносного зниження інтегрального каскадного ризику в просторі параметрів вікон зв'язності. Видно, що поза штрихованою зоною обмеженої застосовності запропонований метод забезпечує додатне зниження інтегрального каскадного ризику в усій дослідженій області параметрів. За малих значень тривалості вікна зв'язності та нормованої пропускну здатності часові й комунікаційні ресурси є недостатніми для стійкого формування прогнозової структури каскадного розвитку, що і визначає область обмеженої застосовності. Поза цією областю ефективність методу зростає зі збільшенням тривалості вікна зв'язності та пропускну здатності, тобто зі зростанням можливостей для уточнення активних залежностей і підтвердження станів вузлів.

Для позначеної на рис. 3 робочої точки з параметрами середнього рівня досягнуто зниження інтегрального каскадного ризику приблизно на 31,8 %, що свідчить про стійкий ефект запропонованого методу вже без переходу до гранично сприятливих режимів зв'язності.

Найбільш показовими є результати третьої серії експериментів, наведені на рис. 4, де досліджено динаміку кількості критичних вузлів, досягнутих каскадом, за переривчастості зв'язності.

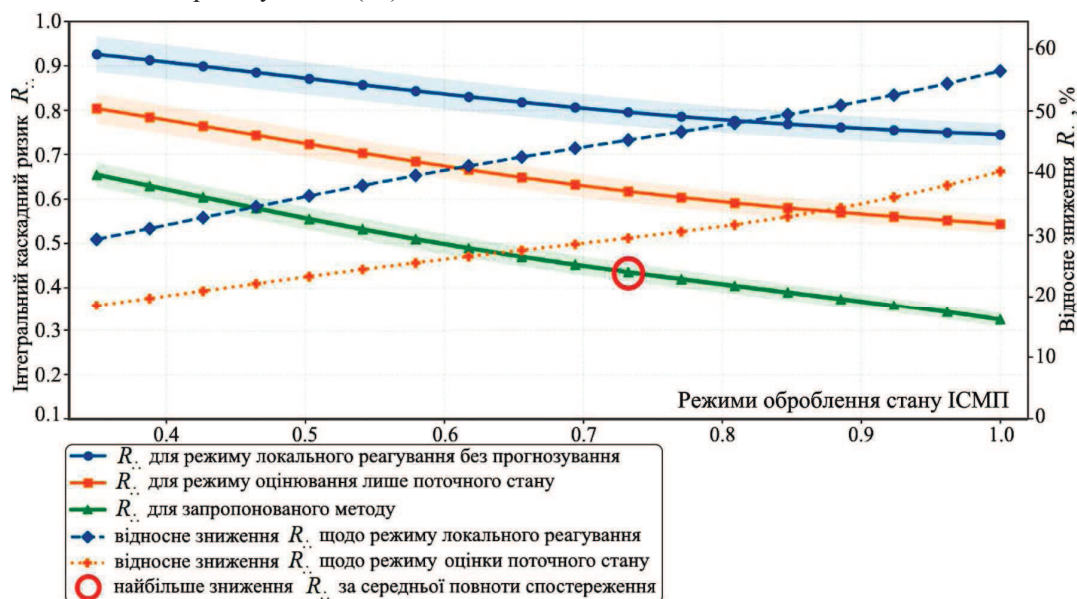


Рис. 2. Залежність  $R_\zeta$  від повноти спостереження / Dependence of  $R_\zeta$  on observation completeness

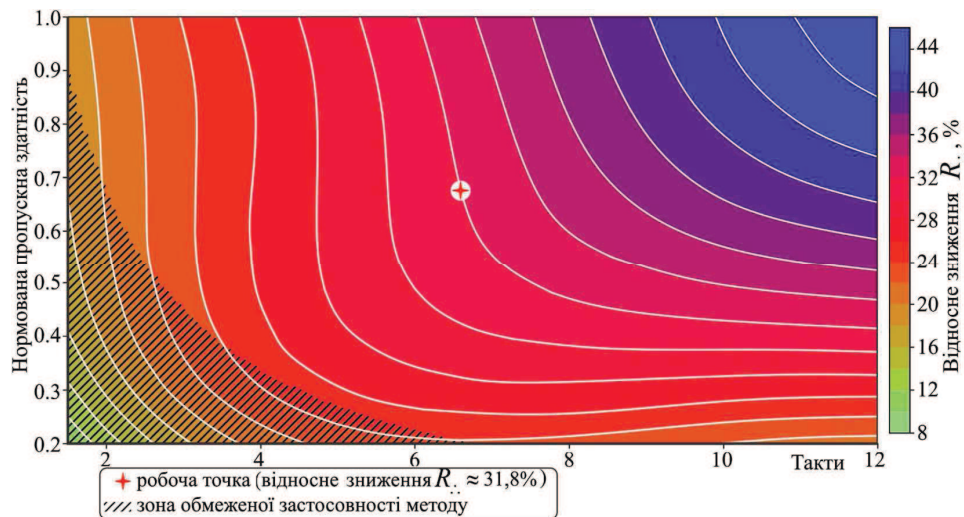


Рис. 3. Карта зменшення  $R_c$ , досягнутого запропонованим методом / Map of the reduction in  $R_c$  achieved by the proposed method

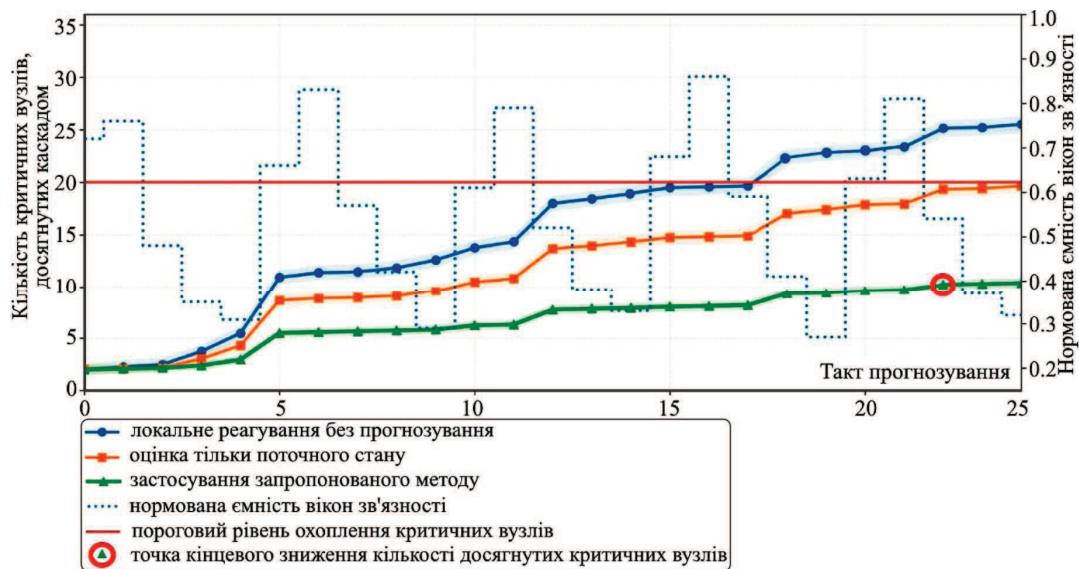


Рис. 4. Динаміка кількості критичних вузлів, досягнутих каскадом, за різних режимів оброблення стану ІСМП в умовах переривчастості зв'язності / Dynamics of the number of critical nodes affected by the cascade under different ISMP state processing modes under intermittent connectivity

На рис. 4 пунктирна крива на правій осі відображає зміну нормованої ємності вікон зв'язності, тобто часову зміну доступних ресурсів для підтвердження станів вузлів та уточнення міжрівневих залежностей. За таких умов обидва базові режими демонструють пришвидшене охоплення критичних вузлів: локальне реагування без прогнозування приводить до найшвидшого зростання їх кількості, а оцінювання тільки поточного стану частково сповільнює цей процес, проте не забезпечує достатнього стримування каскадного розвитку. Запропонований метод формує істотно пологішу траєкторію поширення каскаду та впродовж усього інтервалу прогнозування утримує кількість критичних вузлів, досягнутих каскадом, нижче від порогового рівня охоплення. На завершальному такті інтервалу прогнозування кількість критичних вузлів, досягнутих каскадом, є меншою на 59,3 % порівняно з режимом локального реагування без прогнозування та на 47,1 % порівняно з режимом оцінювання тільки поточного стану.

Отже, динаміка кількості критичних вузлів, які виходять з ладу внаслідок каскадних ефектів в інформаційно-силових мережах (ІСМ) в умовах переривчастості зв'язності, характеризується різким (аварійним) зростанням, що зумовлено поєднанням фізичного перева-

таження та інформаційної нестабільності. В таких системах критичні вузли (наприклад, центри оброблення даних, підстанції, комутатори) з'єднані функціональними залежностями. Для мінімізації кількості критичних вузлів, що виходять з ладу, в умовах переривчастості зв'язності кращим є локальний режим оброблення стану або адаптивні алгоритми, які не створюють сплесків навантаження при повторному підключенні.

Отримані результати дають підстави стверджувати, що основний ефект запропонованого методу формується під впливом трьох взаємопов'язаних чинників:

- метод враховує поточний рівень порушення вузлів та конфігурацію міжрівневих залежностей, через які порушення можуть поширюватися далі;
- до прогнозної структури входять тільки ті переходи, які є допустимими за поточного режиму зв'язності, тому каскад не розширюється за рахунок структурно наявних, але фактично нереалізованих ребер;
- оцінювання каскадного ризику спирається на прогнозні шляхи досягнення критичних вузлів.

Перевага запропонованого методу є найвираженішою за середньої та високої інформаційної визначеності й зберігається за переривчастості зв'язності. Результати обчислювального дослідження підтверджують, що запропонований метод графового прогнозування каскад-

них переходів забезпечує стаке зменшення інтегрально-го каскадного ризику, знижує інтенсивність охоплення критичних вузлів і демонструє перевагу над базовими підходами як за неповного спостереження, так і за змінних параметрів вікон зв'язності. Це підтверджує доцільність використання методу в контурі оперативної підтримки живучості інформаційної системи на мобільній платформі.

**Обговорення результатів дослідження.** У дослідженні [17] запропоновано підхід до моделювання каскадних відмов у взаємозалежних критичних інфраструктурних системах згідно зі стандартом High Level Architecture, що забезпечує інтегрування різнорідних предметно-орієнтованих моделей, відтворення міжсистемних залежностей та простеження механізмів поширення відмов. Одержані в нашій роботі результати узгоджуються з доцільністю явного подання залежностей між вузлами, однак, на відміну від цього дослідження, орієнтовані на прогнозування каскадних переходів у міжрівневій структурі інформаційної системи на мобільній платформі з поточного стану ІСМП.

У дослідженні [2] формалізовано методологію оцінювання прямих і непрямих наслідків події у складній мережі, що охоплює взаємопов'язані інфраструктури та кінцевих споживачів. Доведено, що нехтування непрямыми впливами на мережу знижує оцінювання ризику. Це підтверджує необхідність урахування локального порушення та подальшого поширення його наслідків. Водночас, у цьому дослідженні основний акцент зроблено на виконанні оцінювання наслідків події для інфраструктурних сервісів, тоді як у нашому дослідженні формалізовано прогнозну структуру каскадного розвитку між рівнями даних, процесів і ресурсів та введено оцінювання каскадного ризику як інтегральної характеристики цієї структури.

У праці [10] запропоновано метод аналізу каскадних відмов у взаємозалежних інженерних мережах на основі функціональних залежностей між ними, де введено топологічну модель, імовірності відмови пов'язаних компонентів та показники функціональних втрат. З огляду на системність підходу та логіку явного опису залежностей із подальшим переходом від структури зв'язків до аналізу поширення порушень зазначений підхід є близьким до нашої статті. Водночас, ця праця має галузеву прив'язку до конкретної пари інфраструктурних мереж у межах одного рівня взаємодії, тоді як у нашій статті використано узагальнену міжрівневу графову модель, придатну для прогнозування каскадних переходів у системі з різними рівнями організації.

У роботі [12] розглянуто каскадні відмови у взаємозалежній мережі, в якій вузли можуть втрачати працездатність унаслідок механізму залежності та перевантаження, і запропоновано модель оцінювання стійкості, що дає змогу відстежувати стан кожного вузла в ході каскадного процесу. Для нашого дослідження це важливо, оскільки підтверджує доцільність аналізу розвитку порушень у часі. Також у цій роботі увагу зосереджено на характеристиках стійкості взаємозалежної мережі, однак, у нашій статті предметом формалізації є саме прогнозна структура каскадного розвитку, репрезентативні шляхи до критичних вузлів, міжрівнева глибина поширення та відповідний каскадний ризик на скінченному інтервалі прогнозування.

У дослідженні [20] проаналізовано стійкість командно-керувальних мереж до каскадних відмов у зв'язаній

мережі залежностей між командно-керувальною та інформаційно-комунікаційною мережами, запропоновано модель з асиметричними груповими залежностями та розглянуто стратегії перерозподілу навантаження. Ця робота є близькою за логікою дослідження до нашої у контексті міжвузлових залежностей і механізмів поширення порушень. Проте в цій роботі основну увагу приділено підвищенню стійкості зв'язаної мережі за рахунок організації перерозподілу навантаження, тоді як у нашій статті розв'язується завдання побудови прогнозної структури каскадних переходів у міжрівневій моделі ІСМП та кількісного оцінювання каскадного ризику для множини допустимих шляхів поширення.

Унаслідок обговорення результатів дослідження виявлено, що сучасні праці переважно зосереджені на моделюванні каскадних відмов у взаємозалежних інфраструктурних мережах, оцінюванні функціональних втрат, аналізі стійкості зв'язаних мереж або відтворенні міжсистемного поширення порушень у різних предметних областях. Водночас, залишається невирішеним завдання побудови прогнозної структури каскадного розвитку саме в міжрівневій моделі інформаційної системи з одночасним урахуванням критичності вузлів, конфігурації допустимих шляхів, міжрівневої глибини поширення та моментів досягнення критичних станів, що підтверджує доцільність виконання саме цього дослідження.

Отже, внаслідок виконаної роботи можна сформулювати такі наукову новизну та практичну значущість результатів дослідження.

*Наукова новизна отриманих результатів дослідження* – розроблено метод графового прогнозування каскадних переходів на міжрівневих залежностях ІСМП з оцінюванням каскадного ризику, який поєднує міжрівневу графову формалізацію залежностей між даними, процесами та ресурсами з процедурою побудови прогнозної структури каскадного розвитку та оцінювання каскадного ризику за критичністю залучених вузлів, конфігурацією допустимих шляхів поширення і міжрівневою глибиною переходів, що сукупно забезпечує кількісне ранжування сценаріїв розвитку порушень на скінченному інтервалі функціонування ІСМП.

*Практична значущість результатів дослідження* – запропонований метод можна використати для побудови підсистем оперативної підтримки живучості ІСМП, призначених для виявлення сценаріїв розвитку порушень із підвищеним каскадним ризиком на початкових етапах функціонування системи, кількісного оцінювання та ранжування каскадного ризику, визначення пріоритетності захисту критичних вузлів і підвищення обґрунтованості рішень щодо перерозподілу ресурсів за умов часткової спостережуваності, ресурсних обмежень та переривчастої зв'язності.

## Висновки / Conclusions

Розроблено та апробовано метод графового прогнозування каскадних переходів на міжрівневих залежностях ІСМП з оцінюванням каскадного ризику, який за поточним частково спостережуваним станом ІСМП, структурою міжрівневих залежностей та параметрами вікон зв'язності забезпечує побудову прогнозного розгортання порушень на скінченному інтервалі функціонування ІСМП та кількісне оцінювання каскадного ризику для критичних сервісів, процесів і ресурсних вуз-

лів. За результатами проведеного дослідження можна зробити такі основні висновки.

1. Формалізовано граф міжрівневих залежностей у формі, придатній для прогнозування каскадних переходів, що дало змогу подати можливі напрями поширення порушень між рівнями даних, процесів і ресурсів на скінченному інтервалі функціонування ІСМП з урахуванням критичності вузлів, поточної активності ребер і множин допустимих шляхів досягнення вузлів.
2. Визначено правила реалізації та поширення каскадних переходів між вузлами графа, які забезпечують опис умов ініціювання, індукованої передачі та накопичення каскадних впливів з урахуванням міжрівневих залежностей, локальної вразливості вузла-приймача, параметрів вікна зв'язності та допустимості реалізації переходу в поточному такті.
3. Розроблено процедуру побудови прогнозованої структури каскадного розвитку з поточного стану ІСМП, яка забезпечує формування прогнозованої множини вузлів і зв'язків, залучених до можливого поширення порушень, а також виділення репрезентативних і пріоритетних шляхів досягнення критичних вузлів у межах заданої глибини прогнозування.
4. Формалізовано оцінювання каскадного ризику як функції прогнозованих шляхів поширення та критичності залучених вузлів ІСМП, що забезпечило кількісне ранжування сценаріїв розвитку порушень. За результатами обчислювального дослідження встановлено, що запропонований метод забезпечує стаке зменшення інтегрального каскадного ризику порівняно з локальним реагуванням без прогнозування та з підходом, який обмежується оцінюванням тільки поточного стану ІСМП. Для робочої точки в просторі параметрів вікон зв'язності досягнуто відносного зниження інтегрального каскадного ризику на 31,8 %, а в сценарії часової динаміки охоплення критичних вузлів кінцеве зменшення кількості критичних вузлів, досягнутих каскадом, становило 59,3 % порівняно з локальним реагуванням без прогнозування та 47,1 % порівняно з оцінюванням тільки поточного стану. Найбільший ефект методу відбувається за середньої та високої повноти спостереження та в режимах, де параметри вікон зв'язності є достатніми для підтвердження поточних залежностей і уточнення прогнозованої структури каскаду.

## References

1. Baidya, T., & Moh, S. (2024). Comprehensive survey on resource allocation for edge-computing-enabled metaverse. *Computer Science Review*, 54, article number 100680. <https://doi.org/10.1016/j.cosrev.2024.100680>
2. Brunner, L. G., Peer, R. A. M., Zorn, C., Paulik, R., & Logan, T. M. (2023). Understanding cascading risks through real-world interdependent urban infrastructure. *Reliability Engineering & System Safety*, 241, article number 109653. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2023.109653>
3. Canonico, R., Lista, F., Navarro, A., Sperli, G., & Vignali, A. (2025). Threat detection in reconfigurable Cyber – Physical Systems through Spatio-Temporal Anomaly Detection using graph attention network. *Computers & Security*, 156, article number 104509. <https://doi.org/10.1016/j.cose.2025.104509>
4. Cao, Z., Zhao, H., Wang, Y., He, C., Zhou, D., & Han, X. (2025). A Resilience Quantitative Assessment Framework for Cyber – Physical Systems: Mathematical Modeling and Simulation. *Applied Sciences*, 15(15), article number 8285. <https://doi.org/10.3390/app15158285>
5. Dodonov, O. G., & Lande, D. V. (2021). Network model of structural survivability. *Data registration, storage and processing*, 23(1), 15–22. <https://doi.org/10.35681/1560-9189.2021.23.1.235075>
6. 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>
7. He, S., Zhou, Y., Yang, Y., Liu, T., Zhou, Y., Li, J., Wu, T., & Guan, X. (2024). Cascading Failure in Cyber-Physical Systems: A Review on Failure Modeling and Vulnerability Analysis. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 54(12), 7936–7954. <https://doi.org/10.1109/TCYB.2024.3411868>
8. 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), article number 184. <https://doi.org/10.1007/s10586-024-04893-7>
9. Kharchenko, V., Ponochoyni, 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. DepCoS-RELCOMEX 2025* (Lecture Notes in Networks and Systems, vol. 1427). Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-92734-8\\_9](https://doi.org/10.1007/978-3-031-92734-8_9)
10. Li, Y., & Zhang, M. (2025). Cascading Failure Analysis of Interdependent Water-Power Networks Based on Functional Coupling. *Reliability Engineering & System Safety*, 259, article number 110950. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2025.110950>
11. Lin, L., Gu, A., Min, F., & Zhou, S. (2025). Multi-Level Graph Attention Network-Based Anomaly Detection in Industrial Control System. *Actuators*, 14(5), article number 210. <https://doi.org/10.3390/act14050210>
12. Lv, C., Lei, Y., Zhang, Y., Duan, D., & Si, S. (2025). Resilience of the interdependent network against cascade failure. *Chaos, Solitons & Fractals*, 192, article number 116064. <https://doi.org/10.1016/j.chaos.2025.116064>
13. Romanenkov, Yu. O., & Lobach, O. V. (2018). Interval expansion of methods for complexing forecast estimates. In: V. O. Timofeev, & I. V. Chumachenko, *Mathematical models and new technologies for managing economic and technical systems: monograph*. Panov A. M., 179–191. URL: <https://mmp-conf.org/documents/archive/monography2018.pdf>
14. Ruban, I. V., & Tkachov, V. M. (2025). A model of cross-layer violations and recovery policies for information systems on a mobile platform. *Telecommunication and information technologies*, 3(88), 204–221. <https://doi.org/10.31673/2412-4338.2025.038721>
15. Ruban, I. V., & Tkachov, V. M. (2025). Multilevel model of an information system on a mobile platform and formalization of its survivability criteria. *Visnyk of Kherson National Technical University*, 2, 3(94), 399–409. <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.3.2.51>
16. Tkachov, V., & Ruban, I. (2026). Development of a predictive adaptive resource reallocation method with critical process dispatching in information systems on mobile platforms. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1(3 (139)), 6–23. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2026.350796>
17. Wang, F., Magoua, J. J., & Li, N. (2022). Modeling cascading failure of interdependent critical infrastructure systems using HLA-based co-simulation. *Automation in Construction*, 133, article number 104008. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.104008>
18. 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), article number 79. <https://doi.org/10.3390/jsan14040079>
19. Zhao, B., Wang, M., Lin, W., & Zhang, Q. (2025). Study on the resilience of command and control networks to cascading failures based on asymmetric group dependencies. *Scientific Reports*, 15(1), article number 29487. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-14921-0>
20. Zhao, B., Wang, M., Lin, W., & Zhang, Q. (2025). Study on the resilience of command and control networks to cascading failures based on asymmetric group dependencies. *Scientific Reports*, 15(1), article number 29487. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-14921-0>

21. Zhu, L., Fu, X., Liu, X., & Du, S. (2025). Modeling and analysis of cascade failures in Industrial Internet of Things based on task decomposition and service communities. *Computers & Industrial Engineering*, 206, article number 111177. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2025.111177>

22. Zhu, L., Shang, Y., Li, J., Jia, Y., & Yang, Q. (2024). Reliability-Constrained Task Scheduling for DAG Applications in Mobile Edge Computing. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2024, article ID 6980514. <https://doi.org/10.1155/2024/6980514>

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

*Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine*

## **METHOD FOR GRAPH-BASED PREDICTION OF CASCADING TRANSITIONS ON INTER-LEVEL DEPENDENCIES OF AN INFORMATION SYSTEM ON A MOBILE PLATFORM WITH CASCADING RISK ASSESSMENT**

It has been established that, for information systems on mobile platforms, the combination of partial observability, intermittent connectivity, uneven resource availability, and functionally interconnected components leads to the development of induced disruptions that may spread across the data, process, and resource levels within a short time interval and result in the loss of critical functions. Existing approaches are shown to focus mainly on integral assessment of the current state, selection of a control action, or generation of recovery steps, whereas the problem of constructing a predictive structure of disruption propagation over a finite prediction interval remains insufficiently addressed. Therefore, the aim of this study is to improve the method for graph-based prediction of cascading transitions on inter-level dependencies of an information system on a mobile platform with cascade risk assessment under partial observability and connectivity windows with variable duration and bandwidth. A formalization of the inter-level dependency graph is proposed that combines node-to-level assignment, node criticality, current edge activity, and sets of admissible paths to nodes. Rules for the realization and propagation of cascading transitions are defined with regard to the source-node state, the local vulnerability of the receiving node, the parameters of the connectivity window, and the admissibility of transition realization at the current time step. A procedure is developed for constructing a predictive cascade development structure that makes it possible to form representative paths to critical nodes and determine the inter-level propagation depth. The approach to cascade risk assessment is improved by representing cascade risk as an integral characteristic of the predictive disruption propagation structure with account of the criticality of the involved nodes, the integral intensity and configuration of predictive propagation paths, the inter-level propagation depth, and the moments of reaching critical states. The computational study shows that the improved method for graph-based prediction of cascading transitions with cascade risk assessment provides a stable reduction in integral cascade risk compared with local response without prediction and with the approach limited to assessing only the current system state. The greatest effect is observed at medium and high observation completeness, as well as in regimes where the connectivity-window parameters are sufficient to confirm current dependencies and refine the predictive cascade structure. The practical use of the improved method for graph-based prediction of cascading transitions with cascade risk assessment is advisable as a predictive module in the survivability support loop, since it forms an anticipatory information basis for disruption localization, prioritization of resource support, and substantiation of subsequent control decisions.

**Keywords:** survivability of the information system; cascade risk; partial observability; connectivity windows; critical nodes; representative paths; intermittent connectivity.