

Д. Є. ФРОЛОВ

аспірант, асистент кафедри електронних обчислювальних машин  
Харківський національний університет радіоелектроніки  
ORCID: 0009-0009-3291-3561

## МЕТОД АДАПТИВНОГО РЕЗЕРВУВАННЯ РЕСУРСІВ У БАГАТОРІВНЕВИХ СТРУКТУРАХ СКЛАДНИХ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ

У роботі розглянуто задачу забезпечення відмовостійкості складних інформаційних систем, що мають ієрархічну багаторівневу структуру за умов обмеженого спільного пулу резервних ресурсів. Показано, що статичні схеми резервування та централізовані методи керування, у яких рішення приймає єдиний глобальний контролер, погано масштабуються, створюють «єдину точку відмови» та не забезпечують достатньої гнучкості за наявності множинних та каскадних відмов на різних рівнях системи. Запропоновано мультиагентний метод адаптивного резервування ресурсів у багаторівневих структурах складних інформаційних систем. У межах введеної моделі кожній структурі, рівню та елементу ставиться у відповідність програмний агент, який локально здійснює моніторинг стану об'єкта спостереження, виявляє відмови й деградації, обчислює локальний показник адаптивного резервування, що інтегрує ризик відмови, критичність функцій, очікуване покращення показників якості та витрати резервних ресурсів, і формує формалізовану заявку до агента пулу резерву. Агенти координуються через протокол розподілу спільного сховища резервних ресурсів, у якому заявки ранжуються за агрегрованою корисністю з урахуванням пріоритетів критичних функцій, а рішення про виділення резерву приймаються з дотриманням глобальних обмежень. Проведене імітаційне моделювання для порівняння зі статичним та централізованим підходами показало, що запропонований метод забезпечує приріст інтегральної доступності критичних функцій на 2-3 та 4-6 відсоткових пунктів відповідно, а також – скорочення середнього часу відновлення на 20...30 % завдяки можливості паралельної реакції агентів у різних структурах і відсутності вузького місця у вигляді єдиного контролера. Отримані результати свідчать, що метод адаптивного резервування забезпечує кращий баланс між відмовостійкістю, ефективністю використання резервних ресурсів та масштабованістю для широкого класу багаторівневих складних інформаційних систем.

**Ключові слова:** інформаційна система, метод, відмовостійкість, багаторівневість, резервування.

D. YE. FROLOV

Postgraduate Student, Assistant at the Department of Electronic Computers  
Kharkiv National University of Radio Electronics  
ORCID: 0009-0009-3291-3561

## A METHOD FOR ADAPTIVE RESOURCE RESERVATION IN MULTILEVEL STRUCTURES OF COMPLEX INFORMATION SYSTEMS

The paper addresses the problem of ensuring the fault tolerance of complex information systems that possess a hierarchical multilevel structure under conditions of a limited shared pool of reserve resources. It is shown that static reservation schemes and centralized control methods, in which all decisions are made by a single global controller, scale poorly, create a single point of failure, and do not provide sufficient flexibility in the presence of multiple and cascading failures at different levels of the system. A multi-agent method for adaptive resource reservation in the multilevel structures of complex information systems is proposed. Within the proposed model, a software agent is assigned to each structure, level and element; the agent locally monitors the state of its object, detects failures and degradations, computes a local adaptive reservation index that integrates the failure risk, function criticality, expected improvement of quality indicators and the cost of reserve resources, and generates a formalized request to the reserve-pool agent. The agents are coordinated through a protocol for distributing a shared repository (pool) of reserve resources, in which requests are ranked according to an aggregated utility measure that takes into account the priorities of critical functions, while decisions on resource allocation are made subject to global constraints. Simulation experiments comparing the proposed approach with static and centralized schemes demonstrate that the method provides an increase in the integral availability of critical functions by 2–3 and 4–6 percentage points, respectively, as well as a 20–30% reduction in the mean time to recovery due to the possibility of parallel reactions of agents in different structures and the absence of a bottleneck in the form of a single controller. The obtained results indicate that the adaptive reservation method ensures a better balance between fault tolerance, efficiency of reserve-resource utilization and scalability for a wide class of multilevel complex information systems.

**Key words:** information system, method, fault tolerance, multilevel structure, reservation.

### Постановка проблеми

У царині сучасних інформаційних систем, що функціонують у цифровому середовищі та охоплюють широкий спектр від локальних прикладних комплексів до розподілених кіберфізичних платформ, доцільно виокремити окремий клас об'єктів підвищеної структурної складності, що характеризується ієрархічною, багаторівневою структурою [1-3]. Такі інформаційні системи складаються з множини взаємопов'язаних підсистем (структур), що функціонують у розподіленому середовищі і характеризуються обмеженими ресурсами та враховують набори правил функціонування (політики). Кожна така структура містить кілька рівнів (обчислювальний, мережний, сервісний, прикладний тощо), на яких розміщуються окремі елементи – вузли, сервіси, канали зв'язку, наприклад, віртуальні машини, мікросервіси тощо. Елементи взаємодіють як на одному рівні, так і між рівнями, а також між різними структурами, утворюючи складну розподілену систему з неоднорідними каналами зв'язку, різними профілями навантаження та неоднаковими вимогами до якості обслуговування.

В умовах зростання складності архітектури, використання віртуалізації, контейнеризації та периферійних обчислень істотно підвищуються вимоги до відмовостійкості інформаційних систем. Збої та відмови можуть виникати на рівні окремого елемента, цілого рівня чи всієї структури. При цьому порушення на одному рівні можуть каскадно впливати на інші рівні та структури. Класичні схеми резервування [4] здебільшого задаються статично на етапі проєктування і не враховують динамічної зміни інтенсивності відмов, режимів навантаження, пріоритетів сервісів та фактичної доступності резервного ресурсу.

У реальних умовах експлуатації інформаційних систем існує обмежений, але наперед відомий, пул резервного ресурсу (обчислювальні потужності, дисковий простір, пропускна здатність каналів, резервні екземпляри мікросервісів тощо), який може бути використаний для підвищення відмовостійкості інформаційної системи в цілому. Коли відмова або деградація зазначених елементів виникає локально, тобто на рівні елемента, рівня або структури, то інформаційній системі потрібно оперативно приймати рішення щодо того як задіяти резервні ресурси. При цьому існує сукупність обмежень, яка включає неприпустимість використання максимально наближеного до граничного рівня обсягу резервного ресурсу тільки за рахунок його використання для вирішення низько пріоритетних задач та запобігання виникнення конфліктів між різними локальними рішеннями щодо схем резервування.

Централізовані методи управління резервуванням [5], що передбачають один глобальний контролер (наприклад, оркестратор), який має повну інформацію про стан усієї інформаційної системи й приймає рішення щодо розподілу резерву, – на практиці виявляються обмеженими [6]. Це пояснюється тим, що суцільний збір телеметрії про стан інформаційної системи створює значні затримки та обчислювальне навантаження. Окрім цього глобальний контролер сам стає критичною точкою відмови та вузьким місцем за умов масштабування інформаційної системи. Таким чином, централізований підхід не є адаптивним до сценаріїв, коли відмови виникають одночасно в різних структурах або їх рівнях в інформаційній системі.

Отже, науково-прикладна задача полягає в розробці такого методу резервування, який реалізується на рівні окремих структур, рівнів та елементів, де виникають відмови, та здатний паралельно реагувати на множинні події в різних частинах інформаційної системи і може використовувати загальний обсяг резервного ресурсу при цьому забезпечуючи координацію локальних рішень, з метою уникнення нераціональних витрат резервних ресурсів на менш пріоритетні задачі та не допустити колізії між підсистемами прийняття рішень, що реалізують метод, та конкурують за одну і ту ж саму одиницю резервного ресурсу.

Одним із прикладних підходів до вирішення цієї задачі є використання програмних агентів, які можуть ініціюватися (або мультиплікуватися) в різних частинах інформаційної системи у відповідь на відмови чи погіршення показників її функційної здатності, локально аналізувати ситуацію та формувати пропозиції або приймати локальні рішення, погоджені з глобальними політиками інформаційної системи щодо використання резервного ресурсу [7].

З вищенаведеного витікає, що проблематика даного дослідження полягає у розробці методу адаптивного резервування ресурсів у багаторівневих структурах складних інформаційних систем, який реалізується у вигляді мультиагентної системи програмних агентів, здатних паралельно та узгоджено розв'язувати локальні задачі резервування при спільному використанні обмеженого обсягу резервних ресурсів та забезпеченні заданих показників відмовостійкості для пріоритетних структур, їх рівнів та елементів, що входять до їх складу.

### Аналіз останніх досліджень і публікацій

Проблема адаптивного резервування ресурсів для забезпечення відмовостійкості складних інформаційних систем досліджується в різних предметних галузях – від телекомунікаційних мереж 5G/6G та промислових TSN-мереж до розподілених IoT-платформ. У багатьох дослідженнях даної предметної області [8-10] фокус робиться на динамічному розподілі обчислювальних, мережних та інших ресурсів за умов стохастичних навантажень та обмежень якості обслуговування. Водночас більшість підходів прив'язані до конкретних архітектур, тому не враховують багаторівневості структури інформаційної системи, каскадних міжрівневих залежностей та необхідності розподіленого прийняття рішень агентами, що використовують спільний пул резервних ресурсів.

У інфокомунікаційних системах 5G активно досліджуються методи адаптивного «мережного нарізання», де відмовостійкість критичних сервісів забезпечується за рахунок виділення логічно ізольованих віртуальних «зрізів» із гарантованою пропускнуою здатністю та затримкою. У дослідженні [8] приведено евристичні алгоритми MCRA (Minimum Cost Resource Allocation) та FLDRRA (Fast Latency Decrease Resource Allocation) для динамічного розподілу ресурсів між множиною орендарів у дворівневій 5G-мережі, що поєднує хмарні та граничні вузли.

Ці алгоритми [8] демонструють ефективність щодо зменшення затримки та підвищення доступності ресурсів, але спираються на спрощені припущення, що обмежує їх застосовність до загальних шаблонів трафіку. Крім того, FLDRRA орієнтований переважно на мінімізацію затримки, ігноруючи баланс завантаження вузлів, що призводить до нерівномірного використання ресурсу, а MCRA потенційно спричиняє надмірне виділення ресурсів, коли фактична затримка суттєво краща за вимоги угоди про рівень послуг (SLA). Тобто ці підходи вирішують важливу, але досить вузьку задачу оптимізації ресурсу в однорідній мережній ієрархії, без явного урахування складної, багаторівневої структурної організації інформаційних систем.

У сфері розробки чутливих до затримок мереж (група стандартів IEEE 802.1) існує метод динамічного резервування ресурсів для гарантованого контролю допуску в таких мережах [9]. Запропонований метод інтегровано у протокол розподілу ресурсів та дозволяє децентралізовано адаптувати локальні асимптотичні терміни та резервування пропускнуою здатності для трафіку, ініційованого подіями, що підвищує кількість допущених критичних потоків і збільшує доступну пропускну здатність для некритичного трафіку. Недоліками такого підходу є обмеження на тип підтримуваного трафіку, наявність комунікаційних накладних витрат, що зростають із розміром мережі, а також лінійна залежність обчислювальної складності від кількості вже допущених потоків. Фактично метод вирішує тільки спеціалізовану задачу розподілу пропускнуою здатності в межах окремих частин мережі.

Подібне рішення ієрархічного та адаптивного керування ресурсами розвинуто для класу енергоінформаційних систем. У роботі [10] запропоновано ієрархічну адаптивну та спільну стратегію оптимізації для координації електромобілів, керованих навантажень та накопичувачів енергії в мультимікромережних енергосистемах. Нижній рівень запропонованої моделі оптимізує згладжування піків у межах окремих мікромереж, тоді як верхній рівень використовує динамічний механізм оптимізації для підвищення ефективності енергетичної синергії між мікромережами. При цьому, у дослідженні [10] самі автори відзначають недоліки, пов'язані з фіксованими лінійними графіками налаштування параметрів для еволюційних алгоритмів, що типово для адаптивних оптимізаційних схем.

Аналіз результатів досліджень [8-10] є підґрунтям для розробки нового методу адаптивного резервування ресурсів, у якому програмні агенти, що мультиплікуються в різних частинах інформаційної системи, локально виявляють проблемні елементи, рівні та структури, координують між собою використання спільного обсягу резервних ресурсів і забезпечують виконання глобальних сценаріїв відмовостійкості багаторівневої складної інформаційної системи.

#### Формулювання мети дослідження

Метою дослідження є розробка методу адаптивного резервування ресурсів у багаторівневих структурах складних інформаційних систем, який реалізується у вигляді мультиагентної системи. Ці агенти мають локально виявляти відмови на рівні елементів, рівнів і структур, узгоджено розподіляти спільний обсяг резервних ресурсів з урахуванням пріоритетів та забезпечувати виконання заданих показників відмовостійкості для критичних структурних елементів інформаційної системи в межах виконання нею основної функції.

#### Викладення основного матеріалу дослідження

Багаторівневе подання складної інформаційної системи з обсягом резервних ресурсів можна задати як сукупність взаємодіючих структур (рис. 1):

$$S = \{S_1, S_2, \dots, S_M\}, \quad (1)$$

кожна з яких відповідає певній функціональній підсистемі інформаційної системи. Кожна структура  $S_i$  з (1) має багаторівневу організацію:

$$S_i = \{L_i, \Psi_i, R_i\}, \quad (2)$$

де  $L_i$  – множина рівнів ( $L_i = \{L_{i1}, \dots, L_{ik_i}\}$ );  $\Psi_i$  – множина елементів, що розміщені на рівнях ( $\Psi_i = \{e_{ij}\}$ );  $R_i$  – множина локальних інформаційних та керуючих зв'язків між елементами як в межах рівнів, так і між рівнями.

Між структурами існують міжструктурні зв'язки (обмін даними, реплікація, маршрутизація запитів), що задаються орієнтованим графом:

$$G^\varphi = \langle S, \Psi^\varphi \rangle, \quad (3)$$

де дуги  $\Psi^\varphi$  відображають залежності між структурами (наприклад, структура  $S_1$  надає обчислювальні ресурси структурі  $S_2$ , а та – доступ до виконавчих модулів).

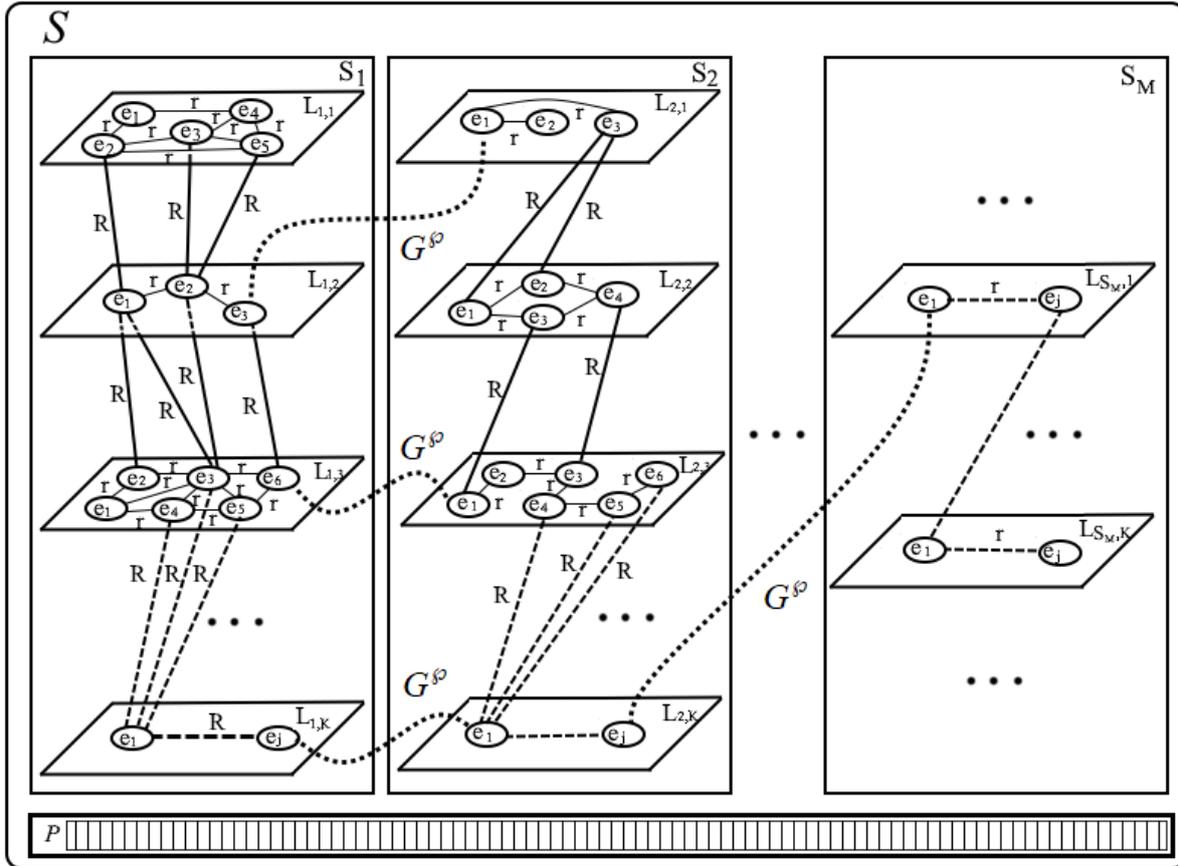


Рис. 1. Багаторівневе подання складної інформаційної системи

У такій інформаційній системі (1) існує спільний обсяг резервних ресурсів:

$$P = \{p_1, \dots, p_H\}, \tag{4}$$

що характеризується вектором місткості резервного ресурсу:

$$C_p = (C_{\xi}, C_{\zeta}, C_{\varsigma}, C_{\chi} \dots), \tag{5}$$

що відображає доступні обчислювальні потужності  $C_{\xi}$ , пам'ять  $C_{\zeta}$ , пропускну здатність  $C_{\varsigma}$ , дисковий простір  $C_{\chi}$  та інші типи ресурсів.

Для кожного елемента  $e_{ij}$  визначається вектор поточного стану

$$e_{ij}(t) \in X_{ij}, \tag{6}$$

який узагальнено включає інформацію про доступність, завантаженість, якісні показники типу затримки, втрати пакетів, середнього часу відгуку сервісу, а також включає індикатори відмовостійкості [11]. На рівні структури  $S_i$  формується агрегований стан:

$$X_i(t) = \{x_{ij}(t)\}_{i,j}, \tag{7}$$

а на рівні всієї інформаційної системи – глобальний стан:

$$X(t) = \{X_i(t)\}_{i=1}^M. \tag{8}$$

Вважається, що для множини критичних функцій інформаційної системи  $F_{\phi}$  задано допустимі обмеження на показники відмовостійкості (ймовірність відмови у розрізі деяких прогнозних моделей [12], середній час відновлення [13], доступність [14] тощо), а також пріоритети структур, рівнів і окремих елементів. Відповідно, в рамках введених формалізмів (1-8) необхідно забезпечити виконання цих обмежень шляхом адаптивного використання обсягу резервних ресурсів.

Тож, для реалізації адаптивного резервування в багаторівневій структурі пропонується мультиагентна система, що діє поверх описаної моделі (1). Вводяться такі типи агентів:

– локальні агенти елементів  $A_{ij}^E$ . Їх особливість полягає в тому, що вони закріплені виключно за конкретними елементами (6);

– агенти рівнів  $A_{il}^L$ , що агрегують інформацію по рівню  $L_{il}$  у структурі  $S_i$ ;

– агенти структур  $A_i^S$ , що відповідають за пріоритети та політики резервування на рівні структури  $S_i$ ;

– агент резервних ресурсів  $A^P$  (системний координатор), що приймає рішення щодо глобального розподілу  $P$

(4) між заявками від агентів елементів, рівнів і структур.

Базовий сценарій реалізації методу може включати тільки локальні агенти  $A_{ij}^E$  та системний координатор  $A^P$ . Агенти рівнів і структур можуть бути реалізовані як надбудови, що виконують попередню агрегацію та ранжування заявок на резервні ресурси, що може запобігати ухваленню квазіоптимальних рішень.

Кожен із агентів  $A_{ij}^E$ ,  $A_{il}^L$ ,  $A_i^S$  характеризується наступними властивостями:

– можливість локалізації області спостереження, у тому числі аналіз стану елементів, рівня або структури, моніторинг локальних показників відмовостійкості та завантаження обчислювальним процесом об'єкту спостереження;

– наявність набору правил виявлення аномалій або відмов, зокрема, порогів для затримок, втрати пакетів, невдалих спроб доступу до ресурсів, зростання частоти помилок тощо;

– наявність механізмів формування заявки на резервний ресурс до агента  $A^P$ ;

– наявність протоколу взаємодії з іншими агентами для узгодження пріоритетів, уникнення колізій, делегування частини повноважень у випадках керованої деградації [15].

Агенти мультиплекуються у просторі інформаційної системи, тобто, у момент запуску або при ініціалізації інформаційної системи створюється базовий набір агентів для всіх елементів, рівнів і структур. У процесі експлуатації інформаційної системи, при появі нових елементів чи суттєвій зміні системної цільової функції, – інформаційна система може ініціювати створення додаткових агентів або змінювати функціонал існуючих завдяки внутрішній підсистемі саморегуляції [16].

У даному дослідженні пропонується механізм прийняття рішення для локальних агентів, що побудований на засадах використання локального показника адаптивного резервування (ЛПАР). ЛПАР відображає доцільність використання резервного ресурсу для елемента або групи елементів інформаційної системи.

На рівні всієї інформаційної системи задача резервування формулюється як багатокритеріальна: для заданих конфігурацій резерву необхідно одночасно мінімізувати інтегральний ризик відмов критичних функцій, максимізувати ступінь забезпечення критичних функцій, максимізувати очікуване покращення показників якості обслуговування та мінімізувати сумарні витрати резервного ресурсу.

Нехай, для агента елемента  $A_{ij}^E$  ЛПАР визначається як:

$$I_{ij}(t) = \alpha_1 R_{ij}^{risk}(t) + \alpha_2 C_{ij}^\Phi + \alpha_3 \Delta Q_{ij}(t) - \alpha_4 C_{ij}^P \quad (9)$$

У (9):

–  $R_{ij}^{risk}(t)$  – оцінка ризику відмови або деградації елемента на основі історії відмов та частоти аварійних подій є безрозмірною величиною та нормується на інтервалі  $[0, 1]$ ;

–  $C_{ij}^\Phi$  – коефіцієнт критичності, що відображає роль елемента у виконанні критичних функцій (частка функцій із множини  $F_\Phi$ , які залежать від  $e_{ij}$ , вага структури  $S_i$  у глобальній ієрархії пріоритетів). Функційно може виступати як ваговий коефіцієнт, який нормується на інтервалі  $[0, 1]$ ;

–  $\Delta Q_{ij}(t)$  – очікуване покращення локальних показників якості та відмовостійкості у разі виділення резерву (зменшення затримки, зростання доступності тощо). Самі показники якості можуть мати різні одиниці (мс,

Мбіт/с, ймовірність втрат тощо). Тому пропонується спочатку нормувати кожен з метрик  $\bar{q}_k = \frac{q_k - q_k^{\min}}{q_k^{\max} - q_k^{\min}} \in [0, 1]$

, потім ввести композитний показник якості  $Q = \sum_k w_k \bar{q}_k$ , який є безрозмірним. Тоді маємо:  $\Delta Q_{ij}(t) = Q'' - Q'$ , де  $Q''$  – значення  $Q$  після резерву, а  $Q'$  – значення  $Q$  до резерву;

$C_{ij}^P$  – питомі витрати резервних ресурсів, що необхідні для підтримки або створення резерву для цього елемента;

$\alpha_1, \dots, \alpha_4$  – вагові коефіцієнти, що задаються політикою системи. Їх значення визначаються на етапі проектування інформаційної системи з використанням методів резервування як результат узгодження пріоритетів між зменшенням ризику відмов, підтриманням критичних функцій, очікуваним вигравшем у показниках якості та допустимими витратами резервного ресурсу. Спочатку всі складові індексу нормуються до безрозмірного вигляду, після чого  $\alpha_k$  обираються так, щоб відобразити відносну важливість відповідних критеріїв. Наприклад, у критичних інформаційних системах  $\alpha_1$  та  $\alpha_2$  отримують більші значення порівняно з  $\alpha_3$  та  $\alpha_4$ . Конкретні значення коефіцієнтів можуть уточнюватися на основі експертних оцінок, процедур багатокритеріального узгодження та калібрування за історичними даними експлуатації інформаційної системи.

ЛПАР (9) реалізує на локальному рівні скаляризацію векторного критерію, роблячи прийняття рішень агентами формалізованим та узгодженим із глобальними вимогами відмовостійкості інформаційної системи.

Аналогічні ЛПАР можуть визначатися для агентів рівня  $A_i^L$  та структури  $A_i^S$ , де враховуються агреговані ризики та критичність відповідного рівня / структури.

На основі (9) локальний агент визначає, чи потрібно активувати резервний ресурс для елемента та формує заявку на резервний ресурс до агента пулу  $A^P$  у вигляді

$$\omega_{ij}(t) = \langle \mu_{ij}, I_{ij}(t), r_{ij}, \pi_{ij}, \tau_{ij} \rangle, \quad (10)$$

де:  $\mu_{ij}$  – ідентифікатор заявки;  $r_{ij}$  – запитуваний вектор ресурсів ( $\xi, \zeta, \varsigma, \chi, \dots$ );  $\pi_{ij}$  – пріоритет заявки (узгоджений із критичністю структури та функцій);  $\tau_{ij}$  – орієнтовний час, на який потрібен резерв.

Таким чином, ЛПАР (9) переносять раніше сформульовані фактичні критерії оптимізації (9) на локальний рівень, роблячи прийняття рішень агентами формалізованим та узгодженим із глобальними вимогами відмовостійкості інформаційної системи.

Для координації агентів пропонується протокол, який застосовується до агента пулу  $A^P$ . Сутність даної координації полягає у реалізації механізму збору заявок (10) від локальних агентів, ранжування заявок за показниками  $I_{ij}(t)$  та пріоритетами  $\pi_{ij}$ , прийняття рішення про виділення ресурсу з урахуванням обмежень  $C^P$ , запобігання нераціональному використанню резервних ресурсів для низькопріоритетних задач, підтримання глобальних сценаріїв відмовостійкості (недопущення збоїв в роботі критичних функцій інформаційної системи).

Загальний вигляд одного циклу роботи  $A^P$  для моменту часу  $t_k$  можна описати у вигляді послідовності кроків:

Крок 1. Збір заявок.  $A^P$  отримує множину заявок  $\Pi(e_k) = \{\omega_{ij}(t_k)\}$ , які надійшли від локальних агентів унаслідок виявлення відмов, деградацій або перевищення порогів.

Крок 2. Нормування ЛПАР. Для порівнянності заявок ЛПАР  $I_{ij}(t_k)$  нормуються до  $[0, 1]$  з урахуванням поточного розподілу ризиків та важливості структур.

Крок 3. Формування впорядкованого списку. Заявки сортуються за спаданням «корисності», наприклад, за величиною

$$U_{ij}(t_k) = \beta_1 I_{ij}(t_k) + \beta_2 \pi_{ij}, \quad (11)$$

де  $\beta_1, \beta_2$  – балансуєчі коефіцієнти.

«Корисністю»  $U_{ij}(t_k)$  вважається агрегований показник доцільності задоволення відповідної заявки, який узагальнює результати формального обчислення ЛПАР  $I_{ij}(t_k)$  та заданий для неї адміністративний пріоритет  $\pi_{ij}$ . Саме за значенням  $U_{ij}(t_k)$  заявки впорядковуються при доступі до спільного обсягу резервних ресурсів.

Коефіцієнти  $\beta_1, \beta_2$  є безрозмірними вагами, що задають баланс між  $I_{ij}(t_k)$  та  $\pi_{ij}$ . Після нормування  $I_{ij}(t_k)$  та  $\pi_{ij}$  до інтервалу  $[0, 1]$  ваги обираються з умов  $\beta_1, \beta_2 \geq 0, \beta_1 + \beta_2 = 1$  і відображають політику інформаційної системи. Так, у критичних сценаріях зазвичай  $\beta_1 > \beta_2$ , тоді як для жорстко регламентованих сервісів із фіксованими SLA може застосовуватися співвідношення  $\beta_2 \geq \beta_1$ . Конкретні значення  $\beta_1, \beta_2$  уточнюються на основі експертних оцінок або налаштувань за результатами імітаційних експериментів.

Крок 4. Ітеративний розподіл резерву. Починаючи з заявки з найбільшим  $U_{ij}(t_k)$ , агент  $A^P$  може виконувати такі дії:

- перевіряти, чи достатньо вільних резервних ресурсів  $C^{free}(t_k)$ ;
- за можливості, задовольняти заявку повністю;
- при дефіциті – або частково задовольняє (якщо дозволено політикою), або відхиляє й переходить до наступної заявки.

Крок 5. Формування рішень. Для кожної заявки формується рішення:

$$d_{ij}(t_k) = \{\eta^+, \eta^\pm, \eta^-\}, \quad (12)$$

де:  $\eta^+$  – повне задоволення заявки;  $\eta^\pm$  – часткове задоволення заявки;  $\eta^-$  – відхилення заявки.

Рішення (12) надсилається відповідному локальному агенту.

Крок 6. Оновлення стану сховища резервних ресурсів. За результатами розподілу оновлюється вектор доступних ресурсів:

$$C^{free}(t_{k+1}) = C^{free}(t_k) - \sum_{\eta^+} r_{ij} + \sum_{\eta^-} r_{ij}, \quad (13)$$

де  $\eta^\times$  – резервні ресурси, що вивільнилися від використання.

Якщо централізований варіант реалізації координатора небажаний через ризик виникнення єдиної точки відмови, агент  $A^P$  доцільно реалізувати як логічно єдину, але фізично розподілену службу на кількох вузлах із використанням механізмів консенсусу [17]. При цьому запропонований метод фіксує саме формальний протокол

взаємодії з агентом  $A^P$ , тоді як вибір конкретної реалізації (централізована, реплікована або повністю розподілена) виконується на рівні цільової інформаційної системи та може змінюватися відповідно до її цільової функції й вимог до відмовостійкості.

Далі наведено алгоритмічну реалізацію мультиагентного методу адаптивного резервування. Запропонований метод використовується в циклічному режимі, що включає два взаємопов'язані алгоритми – алгоритм налаштування та алгоритм адаптації. Нижче подано послідовність кроків алгоритму налаштування:

Крок 1. Формалізація множини структур  $S$ , рівнів  $L_i$ , елементів  $\Psi_i$  та міжрівневих / міжструктурних зв'язків.

Крок 2. Визначення множини критичних функцій  $F_\Phi$ , їх відповідності елементам, рівням і структурам.

Крок 3. Оцінювання базових параметрів відмовостійкості (інтенсивності відмов, і, як наслідок, – відновлень, складність сценаріїв керованої деградації тощо), профілів навантаження та параметрів сховища резервних ресурсів (доступних обсягів і типів ресурсу, а також допустимих режимів його використання).

Крок 4. Вибір та адаптація вагових коефіцієнтів  $\alpha_1, \dots, \alpha_4$ ,  $\beta_1$ ,  $\beta_2$ , порогів ЛПАР, пріоритетів структур, рівнів, елементів.

Крок 5. Відбір допустимих типів резервних конфігурацій (гарячий/холодний резерв, реплікація, міграція тощо) для різних структур, рівнів, елементів.

Крок 6. Ініціалізація агентів  $A_{ij}^E$ ,  $A_{il}^L$ ,  $A_i^S$ ,  $A^P$ .

Далі подано послідовність кроків алгоритму адаптації (один такт адаптації для  $t_k$ ):

Крок 1. Моніторинг стану інформаційної системи. Локальні агенти отримують оновлені стани  $x_{ij}(t_k)$ , показники якості, інформацію про попередні дії із застосування резервних ресурсів.

Крок 2. Виявлення відмов / процесів деградацій. Для кожного елемента, рівня або структури перевіряються умови:

– явна відмова (недоступність, критична помилка);

– деградація за метриками (затримка, втрати даних, кількість повторних спроб запуску процесу);

– наближення до критичних порогів функціонування (обчислювальне перевантаження, заповнення буферів, процесні черги).

Крок 3. Обчислення ЛПАР. Агенти, що виявили проблеми або ризики, обчислюють ЛПАР  $I_{ij}(t_k)$  згідно з (9), де локальний ризик відмови  $R_{ij}^{risk}(t)$ , важливість елемента для критичних функцій  $C_{ij}^\Phi$ , очікуваний ефект від залучення резерву  $\Delta Q_{ij}(t)$  та витрати залучення резервного ресурсу  $C_{ij}^P$  – входять до ЛПАР як нормовані складові, зважені коефіцієнтами  $\alpha_1 \dots \alpha_4$ .

Крок 4. Формування й відправлення заявок. Для елементів / рівнів / структур, де  $I_{il_j}(t_k)$  перевищує заданий поріг, формуються заявки  $\varpi_{il_j}(t_k)$ , які надходять до  $A^P$ .

Крок 5. Глобальний розподіл резерву. Агент  $A^P$  виконує координаційний протокол – нормує ЛПАР, ранжує заявки, застосовує обмеження на глобальний резерв, приймає рішення  $d_{il_j}(t_k)$  та розсилає їх локальним агентам  $A_{ij}^E$ ,  $A_{il}^L$ ,  $A_i^S$ .

Крок 6. Застосування локальних політик відновлення. Залежно від отриманого рішення локальні агенти  $A_{ij}^E$ ,  $A_{il}^L$ ,  $A_i^S$ : активують або створюють резервні екземпляри процесів і сервісів, виконують їх міграцію, перемикають трафік на резервні канали, перебудовують маршрути, конфігурації вузлів тощо.

При цьому форма резервування задається локальною політикою інформаційної системи, але в межах виділеного обсягу резервних ресурсів.

Крок 7. Оновлення глобального стану та показників. Після завершення резервних дій оновлюються стани елементів, рівнів і структур, оцінюються нові значення показників відмовостійкості й якості виконання функцій. У разі потреби результати використовуються для корекції параметрів методу (адаптація  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$ ,  $\beta_1, \beta_2$ ).

Розглянемо **приклад застосування** запропонованого методу до умовної складної інформаційної системи. Нехай інформаційна система складається з кількох структур:

–  $S_1$  – віртуальний обчислювальний кластер вкладеної віртуалізації (рівні: гіпервізори, віртуальні машини, сервіси);

–  $S_2$  – периферійний віртуальний кластер обробки даних із використанням технології прямого відображення апаратних пристроїв у віртуальне середовище;

–  $S_3$  – сегмент користувацьких сервісів (вебзастосунки, API, аналітичні сервіси).

При виникненні відмов на рівні віртуального сервера в  $S_1$  локальні агенти відповідних елементів фіксують зниження рівня доступності віртуальних машин – збільшення затримки доступу, деградацію сервісів (виникнення помилок). Вони обчислюють високі значення  $I_{il_j}(t)$  для найбільш критичних віртуальних машин і формують заявки до пулу резерву на активацію резервних екземплярів на інших віртуальних вузлах.

Паралельно, у структурі  $S_2$  агенти можуть фіксувати перевантаження обчислювальних вузлів через пікове надходження даних від систем моніторингу стану інформаційної системи, а агенти рівня мережних елементів – сплески затримки. Вони також формують заявки на резервний ресурс (додаткові вузли, пропускна здатність мережних каналів, резервні канали).

Агент пулу  $A^P$ , маючи доступ до глобального стану та пріоритетів структур, ранжує заявки наступним чином. Якщо критичні функції в  $S_1$  мають вищий пріоритет (наприклад, вони забезпечують роботу з нееластичними даними), то заявки від  $S_1$  отримують перевагу. Інша частина резервних ресурсів може бути розподілена між заявками від  $S_2$ , за умови, що не будуть порушені глобальні обмеження для критичних сервісів.

У результаті одночасно:

– агенти в  $S_1$  активують резервні ресурси для критичних сервісів;

– агенти в  $S_2$  отримують, наприклад, частковий резерв (меншу кількість додаткових ресурсів) і виконують локальну оптимізацію, розподіляючи нові ресурси між найбільш навантаженими вузлами.

Такий сценарій демонструє, що метод підтримує паралельну роботу агентів у різних структурах, забезпечує узгодження рішень через спільне сховище резервних ресурсів, дозволяє адаптивно змінювати конфігурацію резервування відповідно до поточного стану та пріоритетів.

**Дослідження ефективності запропонованого методу.** Ефективність запропонованого методу адаптивного резервування ресурсів було досліджено за допомогою імітаційного моделювання багаторівневої складної інформаційної системи з використанням розглянутого вище прикладу.

Для кожної структури було змодельовано чотири рівні, на яких розміщувались від 50 до 150 елементів (вузли, сервіси, канали), а також задано множину критичних функцій  $F_\Phi$  з різними пріоритетами.

Моделювання проводилося для трьох варіантів організації резервування:

–  $\Theta_1$  – статичне резервування з фіксованими схемами гарячого / холодного резерву, визначені на етапі проектування та пулом резервних ресурсів, який жорстко закріплено за окремими рівнями та структурами [18];

–  $\Theta_2$  – централізований метод інтегральної оцінки, коли усі рішення щодо резервування приймає централізований контролер, який періодично збирає глобальну інформацію й обирає конфігурації на основі єдиних інтегральних показників пріоритетів [19];

–  $\Theta_3$  – запропонований у цьому дослідженні мультиагентний метод.

Для кожного варіанта було змодельовано серію сценаріїв з одноразовими та множинними відмовами, а також сценарії з каскадними відмовами на кількох рівнях.

Оцінювання ефективності проводилося за такими показниками:

– інтегральна доступність критичних функцій  $A_{crit}$  протягом прогнозованого періоду  $T$ ;

– середній час відновлення робоздатності інформаційної системи після відмов на різних рівнях (MTTR);

– ефективність використання резервних ресурсів, що складається із середнього завантаження пулу резервних ресурсів  $\nu_p$  та частки ресурсів, які не використовувались жодного разу  $\nu_{p^0}$ ;

– частота відхилених заявок на резервування для критичних  $\lambda_{crit}$  та некритичних функцій  $\lambda_{n-crit}$ ;

– накладні витрати мультиагентної взаємодії, що включають кількість службових повідомлень та середній час прийняття рішення про розподіл резервних ресурсів.

У таблиці 1 наведено узагальнені результати порівняння варіантів (відносні значення наведено для зручності порівняння).

Таблиця 1

**Порівняння варіантів резервування**

$\Theta$	$A_{crit}$	MTTR, с	$\nu_p, \%$	$\nu_{p^0}, \%$	$\lambda_{crit}, \%$	$\lambda_{n-crit}, \%$
$\Theta_1$	0.962	48	55	38	5.2	18.7
$\Theta_2$	0.978	34	68	21	3.1	12.5
$\Theta_3$	0.987	27	76	12	1.4	9.3

На рис. 2 показано залежність  $A_{crit}$  від інтенсивності відмов  $\lambda$  для трьох варіантів.

На рис. 2 крива для  $\Theta_3$  проходить вище за  $\Theta_1$  та  $\Theta_2$  у всьому досліджуваному діапазоні, що свідчить про більш стійку підтримку доступності при зростанні частоти відмов.

На рис. 3 наведено порівняння MTTR для різних методів. Для запропонованого методу  $\Theta_3$  спостерігається скорочення середнього часу відновлення на 20-30 % у порівнянні зі статичним підходом  $\Theta_1$  і на 10-15 % у порівнянні з  $\Theta_2$ .

Отримані результати показують, що за доступністю критичних функцій запропонований у цьому дослідженні метод забезпечує зростання  $A_{crit}$  у середньому на 2-3 відсоткові пункти відносно  $\Theta_1$  і на 4-6 відсоткових пунктів відносно  $\Theta_2$ . Це пов'язано з тим, що локальні агенти можуть швидко реагувати на відмови в різних фрагментах інформаційної системи паралельно, не чекаючи глобального оновлення стану всіх елементів.

За середнім часом відновлення  $\Theta_3$  дозволяє скоротити MTTR завдяки локальному прийняттю рішень та відсутності вузького місця у вигляді єдиного централізованого контролера. Це дає можливість пріоритизації заявок від різних структур із урахуванням їх критичності.

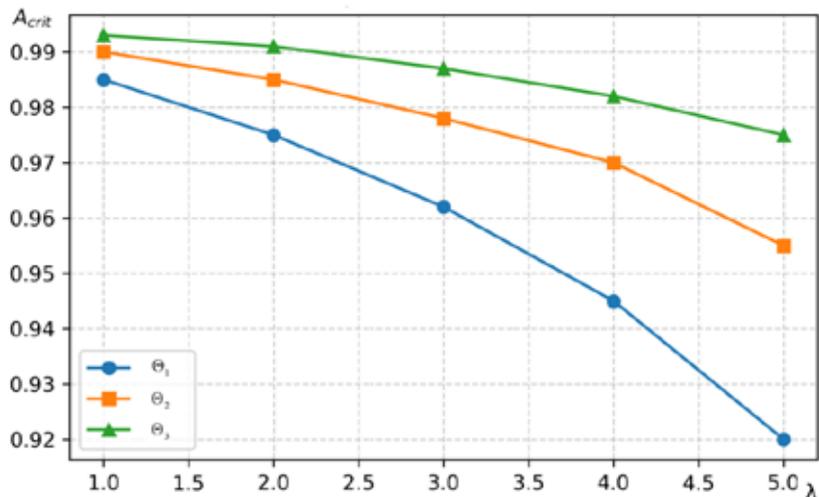


Рис. 2. Залежність  $A_{crit}$  від інтенсивності відмов  $\lambda$

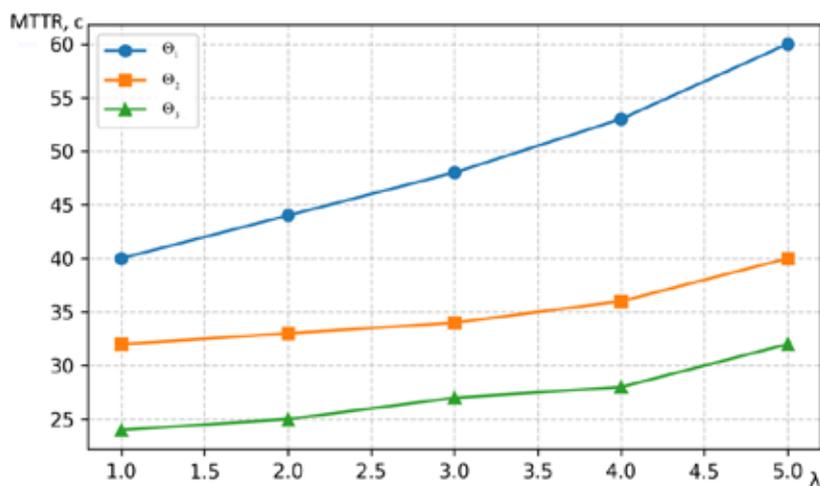


Рис. 3. Залежність MTTR від інтенсивності відмов  $\lambda$

За ефективністю використання сховища резервних ресурсів  $\Theta_1$  залишає значну частину ресурсу без використання для рідкісних, але критичних сценаріїв,  $\Theta_2$  частково усуває цей недолік, але його ефективність обмежена затримками збору загальносистемної телеметрії, а  $\Theta_3$  дозволяє більш гнучко перерозподіляти резервні ресурси між структурами, що зменшує частку невикористаного ресурсу й водночас зберігає запас для критичних функцій високого пріоритету.

Щодо накладних витрат у  $\Theta_3$ , то кількість службових повідомлень зростає лінійно з кількістю агентів, однак, за результатами моделювання, час прийняття колективного рішення про розподіл резерву залишається істотно меншим за характерні часові масштаби розвитку аварійних сценаріїв. За рахунок порогів активації ЛПАР та агрегації заявок для структур та рівнів накладні витрати можуть бути додатково зменшені без суттєвої зміни швидкості прийняття рішень.

Таким чином, результати імітаційного моделювання підтверджують, що запропонований у даному дослідженні метод адаптивного резервування ресурсів забезпечує кращий баланс між відмовостійкістю, ефективністю використання спільного сховища резервних ресурсів та масштабованістю в порівнянні зі статичним та централізованим підходом, особливо в умовах динамічно змінних режимів роботи багаторівневих структур складних інформаційних систем.

**Висновки**

У роботі вирішено науково-прикладну задачу розробки методу адаптивного резервування ресурсів у багаторівневих структурах складних інформаційних систем на основі мультиагентного підходу. Розглянуто інформаційну систему, що складається з сукупності взаємодіючих структур, кожна з яких має багаторівневу організацію та спільний пул резервних ресурсів. На цій основі запропоновано спосіб забезпечення відмовостійкості, коли

рішення щодо резервування приймаються не централізовано, а розподілено – програмними агентами, які діють локально на рівні елементів, рівнів і структур, але координуються через спільного агента резервних ресурсів.

Наукова новизна полягає в тому, що вперше запропоновано мультиагентний метод адаптивного резервування ресурсів у багаторівневих структурах складних інформаційних систем, у якому кожному елементу, рівню та структурі ставиться у відповідність програмний агент, здатний локально виявляти відмови та деградації й формувати формалізовані заявки на резерв, де використовується сховище резервних ресурсів для всієї інформаційної системи, доступ до якого здійснюється за допомогою координаційного протоколу, реалізованого агентом резервних ресурсів, а локальні рішення агентів узгоджуються між собою через ЛПАР, що враховують ризик відмов, критичність функцій, очікуване покращення показників якості та ресурсні витрати на резервування. На відміну від відомих підходів, орієнтованих переважно на конкретні архітектури чи окремі типи ресурсів або централізоване чи важке оптимізаційне управління, запропонований метод працює у загальній багаторівневій моделі складної інформаційної системи, одночасно враховує взаємодію структур, рівнів та елементів, підтримує паралельну роботу множини агентів і оперує спільним сховищем резервних ресурсів, що розподіляється з урахуванням пріоритетів критичних функцій в межах виконання основної функції інформаційною системою.

Дослідження ефективності запропонованого методу показало, що введення системи ЛПАР для агентів, що формально пов'язують ризик відмов, критичність функцій, дають очікуваний вииграш у показниках якості та вартості використання резерву. Побудова координаційного протоколу агента резервних ресурсів, який ранжує заявки, дає ефект накладання глобальних ресурсних обмежень та забезпечує недопущення використання більшої частини резервних ресурсів сховища для низько пріоритетних задач.

Практичне значення одержаних результатів полягає в тому, що запропонований метод може бути використаний як концептуальна основа для реалізації програмних агентів відмовостійкості в сучасних розподілених ІТ-системах (кластерних, хмарних, промислових IoT-платформах). Подальші дослідження доцільно спрямувати на формальне обґрунтування властивостей збіжності й оптимальності координаційного протоколу, побудову імітаційних і натурних експериментів для різних класів навантажень, а також інтеграцію елементів інтелектуального налаштування параметрів агентів без втрати формальних гарантій відмовостійкості.

#### Список використаної літератури

1. Models of Resilient Systems with Online Verification Considering Changing Requirements and Latent Failures / V. Kharchenko et al. *System Dependability – Theory and Applications*. Cham, 2024. P. 90–99. URL: [https://doi.org/10.1007/978-3-031-61857-4\\_9](https://doi.org/10.1007/978-3-031-61857-4_9) (дата звернення: 16.11.2025).
2. Додонов О. Г., Кузнєцова М. Г., Горбачик О. С. Моделювання і оцінювання функціональної стійкості інформаційних систем. Реєстрація, зберігання і обробка даних. 2025. Т. 27, № 1. С. 76–88. URL: <https://doi.org/10.35681/1560-9189.2025.27.1.335752> (дата звернення: 16.11.2025).
3. Рубан І.В., Ткачов В.М. Модель міжрівневих порушень та політик відновлення інформаційної системи на мобільній платформі. Телекомунікаційні та інформаційні технології. 2025. № 3 (88). С. 205–221. URL: <https://doi.org/10.31673/2412-4338.2025.038721> (дата звернення: 16.11.2025).
4. Tkachov V., Mikhnov Y. Analysis of fault tolerance algorithms in multisegment networks. *Проблеми інформатизації: тези доп. 12-ї міжнар. наук.-техн. конф. Баку-Харків-Бельсько-Бяла*. Харків, 2024. Т. 2. С. 59.
5. A Novel Orchestrator Architecture for Deploying Virtualized Services in Next-Generation IoT Computing Ecosystems / F. Mahedero Biot et al. *Sensors*. 2025. Vol. 25, № 3. P. 718. URL: <https://doi.org/10.3390/s25030718> (дата звернення: 16.11.2025).
6. Alsheikh R.S., Fadel E.A., Akkari N.T. Distributed Software-Defined Networking Management: An Overview and Open Challenges. *ARO – The Scientific Journal of Koya University*. 2024. Vol. XII, № 2. URL: <https://doi.org/10.14500/aro.11468> (дата звернення: 16.11.2025).
7. Tkachov V., Hunko M., Volotka V. Scenarios for Implementation of Nested Virtualization Technology in Task of Improving Cloud Firewall Fault Tolerance. 2019 IEEE International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications, Science and Technology (PIC S&T). Kyiv, Ukraine, 2019. P. 759–763. URL: <https://doi.org/10.1109/PICST47496.2019.9061473> (дата звернення: 16.11.2025).
8. Lin J.-Y., Chou P.-H., Hwang R.-H. Dynamic Resource Allocation for Network Slicing with Multi-Tenants in 5G Two-Tier Networks. *Sensors*. 2023. Vol. 23, № 10. P. 4698. URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/23/10/4698> (дата звернення: 16.11.2025).
9. Sifan Yu, Anlan Xie, Feng He, Luxi Zhao. Dynamic Resource Reservation for Deadline-Guaranteed Admission Control in Distributed Time-Sensitive Networking. 2025. Vol. 61. URL: <https://doi.org/10.1049/ell2.70350> (дата звернення: 16.11.2025).
10. Adaptive and Collaborative Hierarchical Optimization Strategies for a Multi-Microgrid System Considering EV and Storage / Y. He et al. *World Electric Vehicle Journal*. 2025. Vol. 16, № 7. P. 363. URL: <https://doi.org/10.3390/wevj16070363> (дата звернення: 16.11.2025).

11. Method to Determine Fault-Tolerant Performance Probability of High-Survivability Computer Network based on Mobile Platform / V. Tkachov et al. 2021 IEEE 8th International Conference on Problems of Infocommunications, Science and Technology (PIC S\&T). Kharkiv, Ukraine, 2021. P. 1–5. URL: <https://doi.org/10.1109/PICST54195.2021.9772202> (дата звернення: 16.11.2025).
12. Reliability prediction and evaluation of communication base stations in earthquake prone areas / X. Li et al. Scientific Reports. 2023. Vol. 13, № 1. P. 8981. URL: <https://doi.org/10.1038/s41598-023-35841-x> (дата звернення: 16.11.2025).
13. Ткаченко О., Чепурна І. Метод забезпечення відмовостійкості мікросервісів у AWS. Сучасні напрями розвитку інформаційно-комунікаційних технологій та засобів управління: тези доп. XV міжнар. наук.-техн. конф. 2025. Т. 2. С. 44.
14. Frolov D. Y. Mathematical model of a multilayer information system for stream data processing. Радіоелектроніка та молодь у XXI столітті : матеріали 29-го Міжнар. молодіж. форуму, 16–19 квітня 2025 р. Харків, 2025. Т. 5. С. 11–12.
15. Лисенко С. М., Харченко В. С., Бобровнікова К. Ю., Щука Р. В. Резильєнтність комп'ютерних систем в умовах кіберзагроз: таксономія та онтологія. Радіоелектронні і комп'ютерні системи. 2020. № 1. С. 17–28.
16. Kosińska J., Zieliński K. Enhancement of Cloud-Native Applications with Autonomic Features. Journal of Grid Computing. 2023. Vol. 21, № 3. P. 44. URL: <https://doi.org/10.1007/s10723-023-09675-w> (дата звернення: 16.11.2025).
17. A survey on fault-tolerant consensus control of multi-agent systems: trends, methodologies and prospects / C. Gao et al. International Journal of Systems Science. 2022. Vol. 53. № 13. P. 2800–2813. URL: <https://doi.org/10.1080/00207721.2022.2056772> (дата звернення: 16.11.2025).
18. Dui H., Xu H., Zhang Y.-A. Reliability Analysis and Redundancy Optimization of a Command Post Phased-Mission System. Mathematics, 2022. Vol. 10, № 22. P. 4180. URL: <https://doi.org/10.3390/math10224180> (дата звернення: 16.11.2025).
19. Khare P., Reddy M. J. B. Wide Area Measurement-Based Centralized Power Management System for Microgrid with Load Prioritization. Energies, 2025. Vol. 18, № 9. P. 2289. URL: <https://doi.org/10.3390/en18092289> (дата звернення: 16.11.2025).

#### References

1. Kharchenko, V., Ponochovnyi, Y., Dotsenko, S., Illiashenko, O., & Ivasiuk, O. (2024). Models of Resilient Systems with Online Verification Considering Changing Requirements and Latent Failures. In International Conference on Dependability of Computer Systems (pp. 90-99). Cham: Springer Nature Switzerland. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-61857-4\\_9](https://doi.org/10.1007/978-3-031-61857-4_9)
2. Dodonov, O. H., Kuznietsova, M. H., & Horbachyk, O. S. (2025). Modeliuvannya i otsiniuvannya funktsionalnoi stiikosti informatsiinykh system. Reiestratsiia, zberihannya i obrobka danykh, 27(1), 76-88.
3. Ruban, I., & Tkachov, V. (2025). Model mizhrivnevnykh porushen ta polityk vidnovlennia informatsiinoi systemy na mobilnii platformi. Telekomunikatsiini ta informatsiini tekhnolohii, (3), 204-221. <https://doi.org/10.31673/2412-4338.2025.038721>
4. Tkachov, V., & Mikhnov, Y. (2024). Analysis of fault tolerance algorithms in multisegment networks. Problemy informatyzatsii: tezy dop. 12-yi mizhnar. nauk.-tekhn. Konf, 2, p.59
5. Biot, F. M., & others. (2025). A Novel Orchestrator Architecture for Deploying Virtualized Services in Next-Generation IoT Computing Ecosystems. Sensors, 25(3), 718. <https://doi.org/10.3390/s25030718>
6. Alsheikh, R., Fadel, E., & Akkari, N. (2024). Distributed Software-Defined Networking Management: An Overview and Open Challenges. ARO – The Scientific Journal of Koya University, XII(2). <https://doi.org/10.14500/aro.11468>
7. Tkachov, V., Hunko, M., & Volotka, V. (2019). Scenarios for Implementation of Nested Virtualization Technology in Task of Improving Cloud Firewall Fault Tolerance. In 2019 IEEE International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications, Science and Technology (PIC S\&T) (pp. 759–763). <https://doi.org/10.1109/PICST47496.2019.9061473>
8. Lin, J.-Y., Chou, P.-H., & Hwang, R.-H. (2023). Dynamic Resource Allocation for Network Slicing with Multi-Tenants in 5G Two-Tier Networks. Sensors, 23(10), 4698. <https://www.mdpi.com/1424-8220/23/10/4698>
9. Yu, S., Xie, A., He, F., & Zhao, L. (2025). Dynamic Resource Reservation for Deadline-Guaranteed Admission Control in Distributed Time-Sensitive Networking. Electronics Letters, 61. <https://doi.org/10.1049/ell2.70350>
10. He, Y., & others. (2025). Adaptive and Collaborative Hierarchical Optimization Strategies for a Multi-Microgrid System Considering EV and Storage. World Electric Vehicle Journal, 16(7), 363. <https://doi.org/10.3390/wevj16070363>
11. Tkachov, V., & others. (2021). Method to Determine Fault-Tolerant Performance Probability of High-Survivability Computer Network based on Mobile Platform. In 2021 IEEE 8th International Conference on Problems of Infocommunications, Science and Technology (PIC S\&T) (pp. 1–5). <https://doi.org/10.1109/PICST54195.2021.9772202>

12. Li, X., & others. (2023). Reliability prediction and evaluation of communication base stations in earthquake prone areas. *Scientific Reports*, 13(1), 8981. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-35841-x>
13. Tkachenko, O., & Chepurna, I. (2025). Metod zabezpechennia vidmovostiikosti mikroservisiv u AWS. U Suchasni napriamy rozvytku informatsiino-komunikatsiinykh tekhnolohii ta zasobiv upravlinnia: tezy dop. XV mizhnar. nauk.-tekh. konf. (p. 44).
14. Frolov, D. Y. (2025). Mathematical model of a multilayer information system for stream data processing. In *Radioelektronika ta molod u XXI stolitti: materialy 29-ho Mizhnar. molodizh. forumu.* (pp. 11–12).
15. Lysenko, S., Kharchenko V., Bobrovnikova K., & Shchuka R. (2020). Rezylientnist kompiuternykh system v umovakh kiberzahroz: taksonomiia ta ontolohiia. *Radioelektronni i kompiuterni systemy*, (1), 17–28.
16. Kosińska, J., & Zieliński, K. (2023). Enhancement of Cloud-Native Applications with Autonomic Features. *Journal of Grid Computing*, 21(3), 44. <https://doi.org/10.1007/s10723-023-09675-w>
17. Gao, C., & al., e. (2022). A survey on fault-tolerant consensus control of multi-agent systems: trends, methodologies and prospects. *International Journal of Systems Science*, 53(13), pp.2800–2813. <https://doi.org/10.1080/00207721.2022.2056772>
18. Dui, H., Xu, H., & Zhang, Y.-A. (2022). Reliability Analysis and Redundancy Optimization of a Command Post Phased-Mission System. *Mathematics*, 10(22), 4180. <https://doi.org/10.3390/math10224180>
19. Khare, P., & Reddy, M. J. B. (2025). Wide Area Measurement-Based Centralized Power Management System for Microgrid with Load Prioritization. *Energies*, 18(9), 2289. <https://doi.org/10.3390/en18092289>

*Дата першого надходження рукопису до видання: 25.11.2025*  
*Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 22.12.2025*  
*Дата публікації: 31.12.2025*