УДК 004.414.23.05:004.77 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.3.2.51

І. В. РУБАН
доктор технічних наук, професор,
професор кафедри електронних обчислювальних машин
Харківський національний університет радіоелектроніки
ORCID: 0000-0002-4738-3286

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

БАГАТОРІВНЕВА МОДЕЛЬ ІНФОРМАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ НА МОБІЛЬНІЙ ПЛАТФОРМІ ТА ФОРМАЛІЗАЦІЯ КРИТЕРІЇВ ЇЇ ЖИВУЧОСТІ

Стаття присвячена формалізації живучості інформаційних систем на мобільній платформі з урахуванням переривчастої зв'язності, часткової спостережуваності та жорстких ресурсно-часових обмежень. Запропоновано багаторівневу модель (рівні даних, процесів і управляюче-ресурсний), в якій узгодження між рівнями фіксуються у вигляді інваріантів причинно-часової консистентності та SLO-вимог. Уведено клас допустимих траєкторій функціонування та ядро живучості як множину станів, з яких існує політика, що утримує систему в допустимій області попри збурення і «вікна доступності». Для ризик-чутливої оцінки деградації процесів використано механізм CVaR над дефіцитами SLO, що дозволяє враховувати події з «тяжкими хвостами». Причинно-часову адекватність даних формалізовано через метрики частки порушень причинності та втрати валідності, а здійсненність політик – через канальні, обчислювальні та енергетичні бюджети з урахуванням часових обмежень на їх виконання. Запропоновано три індекси живучості (найслабкішої ланки, зважений, послідовний), які агрегують нормовані показники ризику процесів, консистентності даних і часово-ресурсної здійсненності, що дає прозорий інструмент пріоритезації режимів та вибору керованих сценаріїв деградації. Новизна полягає у вперше поданій у єдиному формалізмі композиційній моделі, яка інтегрує ризик процесів, причинно-часову семантику даних і планову здійсненність політик та забезпечує операторне обчислення ядра живучості для швидкої діагностики стану в реальному часі. Практична цінність полягає у можливості оперативного порівняння політик і регламентів експлуатації для БПЛА/робототехнічних платформ, своєчасного виявлення «вузьких місць» і раціонального перерозподілу ресурсів з метою підтримання критичних процесів інформаційної системи у динамічних умовах.

Ключові слова: *інформаційна система, мобільна платформа, живучість, переривчаста зв'язність, ядро живучості, індекс живучості.*

I. V. RUBAN
Doctor of Technical Sciences, Professor,
Professor at the Department of Electronic Computers
Kharkiv National University of Radio Electronics
ORCID: 0000-0002-4738-3286

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

MULTILEVEL MODEL OF AN INFORMATION SYSTEM ON A MOBILE PLATFORM AND FORMALIZATION OF ITS SURVIVABILITY CRITERIA

The article is devoted to the formalization of the survivability of information systems on a mobile platform under intermittent connectivity, partial observability, and stringent resource–time constraints. We propose a multilevel model (data, process, and control-and-resource layers) in which cross-layer agreements are captured as invariants of causal–temporal consistency and SLO requirements. We introduce a class of admissible operational trajectories and a survivability kernel defined as the set of states from which there exists a policy that keeps the system within the admissible region despite

disturbances and "availability windows." To obtain risk-sensitive assessments of service degradation, we employ CVaR over SLO shortfalls, which accounts for heavy-tailed events. Causal–temporal validity of data is formalized via metrics for the fraction of causality violations and loss of validity, while policy feasibility is constrained by communication-channel, computational, and energy budgets subject to execution deadlines. We further propose three survivability indices (weakest-link, weighted, and sequential) that aggregate normalized measures of process risk, data consistency, and time-and-resource feasibility, providing a transparent tool for prioritizing operating modes and selecting controlled degradation scenarios. The novelty lies in a first, unified formalism for a compositional model that integrates service risk, the causal–temporal semantics of data, and the planned feasibility of policies, enabling operator-based computation of the survivability kernel for rapid state diagnosis in real time. The practical value is the ability to rapidly compare policies and operating procedures for UAV/robotic platforms, promptly identify bottlenecks, and rationally reallocate resources to sustain critical services in dynamic environments.

Key words: *information system, mobile platform, survivability, intermittent connectivity, survivability kernel, survivability index.*

Постановка проблеми

В умовах російської агресії проти України особливої ваги набуває застосування інформаційних систем на мобільних платформах, що працюють у середовищах із переривчастою зв'язністю та дефіцитом ресурсів [1–2]. Відтак забезпечення їхньої живучості стає необхідною умовою безперервного виконання покладених функцій.

У фундаментальних роботах вітчизняних та іноземних наукових шкіл пропонуються багатовекторні підходи – від функціональної та структурної живучості інформаційних систем до застосування моделей, що залучають апарат складних мереж і перколяції для виявлення критичних порогів збереження зв'язності та працездатності системи [3–7].

Разом із тим, класична теорія живучості інформаційних систем сформована переважно для статичних або інфраструктурно-центрованих інформаційних систем, де припущення про відносну сталість ресурсного середовища, стабільну топологію та безперервну зв'язність є прийнятними [8–11]. У інформаційних системах, які функціонують на базі мобільних платформ, ці припущення не завжди застосовні [12–13]. Це пов'язано з тим, що простір станів інформаційної системи може еволюціонувати під впливом переривчастої зв'язності, динамічної зміни топології та «ковзних» ресурсно-часових обмежень. При цьому траєкторії функціонування інформаційних систем можуть бути фрагментарними, а режими деградації унаслідок зовнішнього впливу – багатокритеріальними та контекстно-залежними [14].

Проведено аналіз класичних метрик інформаційних систем, зокрема таких як готовність, MTTF/MTTR, індекси зв'язності елементів інформаційної системи та ентропійні показники. Результати аналізу вказують на те, що метрики адекватно відображають загальний стан функціональної спроможності інформаційної системи, якщо вона функціонує в умовах статичних середовищ. Втім, якщо інформаційна система розгорнута на мобільній платформі (в умовах динамічного середовища), зазначені метрики дають істотні похибки, оскільки не охоплюють: ризику рідкісних, але «важких» збурень; причинно-часову узгодженість даних за переривчастих зв'язків між елементами інформаційної системи; досяжність в реалізації політик управління інформаційною системою в межах жорстких часових обмежень на прийняття рішень.

Виходячи з того, що ці показники не враховують структуру «тяжких хвостів» збурень і навантажень, причинно-часову семантику даних в умовах переривчастої зв'язності, часово-ресурсну здійсненність політик управління за наявних обмежень часу та бюджетних обмежень, – виникає задача побудови багаторівневої моделі живучості інформаційної системи на мобільній платформі, яка формалізує простір станів та аксіоматику у трирівневій структурі (управляюче-ресурсний, процесний рівень і рівень даних); визначає клас допустимих траєкторій і ядро життєздатності, що гарантують підтримку мінімального набору сервісних (процесних) підсистем, без яких цільова функція системи не виконується у режимах деградації; уводить ризик-чутливий критерій процесної адекватності для врахування подій із «тяжкими хвостами» (heavy-tailed) [15–16]; формалізує причинно-часову консистентність даних за переривчастої зв'язності між елементами моделі; визначає інтегральний показник часово-ресурсної здійсненності політик управління під заданими обмеженнями.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Аналіз досліджень у сфері моделювання інформаційних систем на мобільній платформі демонструють зміщення вектору досліджень до моделей забезпечення працездатності переважно прикладних систем, однак більшість досліджень залишаються вузькоорієнтованими без інтеграції процесної адекватності та семантики даних у єдину модель.

Наприклад, у статті [17] сформульовано ієрархічну задачу розміщення безпілотних базових станцій і організації маршрутизації між ними; застосовано MILP-модель і кластерно-метаевристичний алгоритм для одночасної оптимізації покриття і довжин маршрутів. Попри інженерну цінність, робота зосереджується на мережно-операційному рівні, зокрема, авторами не вводяться ризик-чутливі критерії для подій із «тяжкими хвостами», відсутня формалізація причинно-часової консистентності даних у режимі переривчастої зв'язності. У підсумку модель,

запропонована у роботі [17] корисна для планування топології, але не дає цілісної відповіді на питання живучості процесів і даних у динамічному середовищі.

Так, у статті [18] запропоновано ризик-орієнтоване планування енергетичного ресурсу для мікромереж із використанням підходу CVaR, що переконливо моделює дефіцит енергії та невизначеність генерації/споживання. Проте ризик трактовано на ресурсному шарі, без підняття його на рівень процесної адекватності, не враховано переривчасту зв'язність і узгодженість даних, хоча останнє варіює як предмет подальших досліджень.

Таким чином, найбільш дотичні роботи або оптимізують мережні структури, або керують окремими ресурсами в умовах невизначеності, проте у них відсутнє представлення багаторівневої моделі, що одночасно охоплює ризик для процесів інформаційної системи, причинно-часову консистентність даних і часово-ресурсну здійсненність політик.

Формулювання мети дослідження

Мета роботи полягає у розробці багаторівневої моделі інформаційної системи на мобільній платформі, що формалізує аксіоматику та простір станів на кожному з рівнів, визначає клас допустимих траєкторій і ядро життєздатності, а також формалізації критеріїв живучості зазначеної інформаційної системи: ризик-чутливу процесну адекватність для подій із «тяжкими хвостами», причинно-часову консистентність даних за переривчастої зв'язності та інтегральну часово-ресурсну здійсненність політик.

Викладення основного матеріалу дослідження

Формалізація моделі. В рамках тематики дослідження та враховуючи [19–21], під інформаційною системою вважатимемо наступний кортеж:

$$\mathrm{I} = \langle U, D, S, R, P, Q, E \rangle, \tag{1}$$

де: U – множина управляючих дій в інформаційній системі; D – простір даних, що використовується інформаційною системою у процесі реалізації нею основної функції; S – множина процесів інформаційної системи, що оперує з простором даних D; R – сукупність абстрактних ресурсів інформаційної системи; P – сукупність політик функціонування інформаційної системи у процесі реалізації нею основної функції; Q – сукупність вимог якості та логіко-часових константних інваріантів; E – сукупність класів факторів впливу зовнішнім середовищем.

Нехай траєкторія функціонування інформаційної системи описується переходами станів у рамках виконання нею основної функції як:

$$x_{t+1} = F(x_t, u_t, e_t), \quad x_t \in X, \quad u_t \in U(x_t), e_t \in E, \tag{2}$$

де: X – простір станів інформаційної системи; u_t – управляючі дії інформаційної системи у процесі її функціонування; e_t – клас факторів впливу зовнішнім середовищем на інформаційну систему.

Відповідно, на рівні архітектури інформаційної системи простір станів інформаційної системи X може бути декомпонований на такі рівні:

$$X = X_D \times X_S \times X_R, \tag{3}$$

де: X_D – рівень даних; X_S – процесний рівень; X_R – управляюче-ресурсний рівень.

Взаємодію між рівнями можна задати як міжрівневі погодження: Ξ_{DS} – семантика послідовності подій і їх консистентності, що необхідні для коректного виконання процесів; Ξ_{SR} – вимоги процесів до абстрактних ресурсів і допустимих втрат у процесі доступу до них.

Зазначена формалізація виду інформаційної системи (1–3) узгоджує класичні погляди з сучасною SLO-концепцією [22]. Однак, розглядаючи інформаційну систему як систему, яка функціонує на базі мобільної платформи (БПЛА, рій БПЛА або інші робототехнічні платформи), виходячи із задачі, що сформульована у статті, варто врахувати той факт, що зазначена платформа додає часову та топологічну мінливість і часткову спостережуваність [23].

Перехід від класичної інформаційної системи до інформаційної системи на мобільній платформі формально означає перехід від (майже) стаціонарного середовища до динамічного, в якому змінюється логічна топологія зв'язності елементів інформаційної системи, набувають динамічного характеру, за рахунок факторів мобільності та наявності зовнішнього впливу, обсяги таких характеристик як ємність каналів обміну даними, продуктивність обчислень, ресурсний запас дій. У такому середовищі функціонування інформаційної системи доцільно застосовувати термін «процес» як одиницю моделювання, так як саме процеси найчастіше еволюціонують у часі під впливом зазначених факторів мобільності.

Динамічний контекст у формалізованій формі може бути заданий як сукупність таких ознак:

– темпорально-топологічна мінливість, при якій логічна структура інформаційної системи може бути задана динамічним графом $G = (V, E_t)$ в якому кожне логічне ребро $e = (i, j)$, $e \in E$ має бінарну доступність $a_{e,t} \in \{0, 1\}$ та ємнісну місткість $c_{e,t} \geq 0$. Мобільність платформи в даному випадку індукує процес доступності $a_{e,t}$ з періодами доступності / недоступності елементів інформаційної системи в залежності від дії факторів мобільності без настання критичної відмови у функціонуванні системи, однак тривалість періодів недоступності може мати характер «тяжкого хвосту»;

– часткова спостережуваність, коли стан інформаційної системи, що заданий як $x_t = (x_t^D, x_t^S, x_t^R)$, , спостерігається через $o_t = h(x_t)$, що включає параметри агрегованої телеметрії (при наявності ознак розподіленої інформаційної системи), прогнозований стан вікон зв'язності елементів інформаційної системи, індикатори стану процесів тощо. Через наявні затримки оцінки стану інформаційної системи, спричинені факторами мобільної платформи, політика p реалізується інформаційною системою з неповною та застарілою інформацією;

– наявність вікон можливостей, коли дані, передаються за відомою моделлю «opportunity-driven» [24], коли $a_{e,t} = 1$, дозволені пересилки з обмеженнями по $c_{e,t}$, а між вікнами – за принципом буферизації та подальшої ретрансляції (логічна буферизація провадиться на рівнях X_D та X_S);

– формалізація політик функціонування інформаційної системи як реплікації артефактів даних у дозволені часові вікна, зміни режимів виконання процесів згідно з даними про деградацію системи та сукупності розподілу заданих бюджетів системи планування задач інформаційної системи з кінцевими часовими точками виконання:

$$B = \left\{ B_t^{channel}, B_t^{CPU}, B_t^{energy} \right\}, \tag{4}$$

де: $B_t^{channel}$ – канальний бюджет (впливає на визначення значення пропускної здатності у вікні зв'язку); B_t^{CPU} – обчислювальний бюджет (впливає на визначення значення умовних обчислювальних квантів, які можна витратити на задачі, що вирішуються інформаційною системою); B_t^{energy} – енергетичний бюджет (впливає на час виконання задачі з урахуванням обмежень мобільної платформи).

Враховуючи вищезазначені ознаки та формалізацію моделі інформаційної системи маємо наступні проміжні висновки. По-перше, міжрівневі домовленості можна розглядати як інваріанти. Це обґрунтовується тим, що Ξ_{SR} пов'язує ресурси інформаційної системи з SLO-вимогами до процесів [22], а Ξ_{DS} фіксує причинно-часову семантику даних (наприклад, допустиму частку порушень порядку подій, що граничний часовому проміжку валідності інформації для інформаційної системи). При цьому порушення будь-яких взаємодомовленостей призводить до переходу стану інформаційної системи у допустиму область $X \backslash G$.

По-друге, збурення у функціональній здатності інформаційної системи (включно з випадками «тяжких хвостів» під час вікон недоступності) оцінюються через дефіцит SLO критичних процесів, що виступає у вигляді умови як первинна функція ризику для прийняття рішень щодо обрання політики функціонування інформаційної системи.

По-третє, фактори мобільності призводять до розривів причинного порядку та втрати валідності даних, що циркулюють в інформаційній системі, тому модель у явному вигляді містить метрику частки порушень причинності μ та граничної втрати валідності даних η, і, як наслідок, визначають політики функціонування інформаційної системи, що керують функціональною здатністю у вікнах доступності.

Виходячи з (4), формалізація траєкторії на рівнях (3) з урахуванням дії політик інформаційної системи може бути формалізована, виходячи з того, що управляючі дії інформаційної системи у процесі її функціонування (2) задаються як $u_t = (u_t^D, u_t^S, u_t^R)$ для кожного з рівнів:

– для рівня даних X_D:

$$x_{t+1}^D = F_D(x_t^D, u_t^D, w_t^D, a_t), \tag{5}$$

де: x_t^D – мітки часу, версійні сценарії, причинні залежності; u_t^D – процеси реплікації, маршрутизації, узгодження; w_t^D – стохастика процесів навантаження/доступності; a_t – показник доступності логічних каналів у розрізі впливу факторів мобільності платформи.

Індикатори μ, η в таких умовах оновлюються з урахуванням появи вікон доступу;

– для процесного рівня X_S:

$$x_{t+1}^S = F_S(x_t^S, u_t^S, w_t^S, a_t, c_t), \tag{6}$$

де: x_t^S – індикатори SLO мінімального критичного набору даних, який задається на етапі формулювання основної функції інформаційної системи; u_t^S – процеси перемикання політик/режимів функціонування інформаційної системи, пріоритезації процесів; c_i – показник місткості логічних каналів у розрізі впливу факторів мобільності платформи;

– для управляюче-ресурсного рівня X_R:

$$x_{t+1}^R = F_R(x_t^R, u_t^R, w_t^R), \tag{7}$$

де: x_t^R – сукупність (4), черг завдань, граничних часових точок виконання процесів; u_t^R – рішення про розподіл (4) і запуск / пріоритизацію процесів.

Збурення $w_t = (w_t^D, w_t^S, w_t^R)$ допускають появу «тяжких хвостів», на кшталт, субекспоненціальних та α-стабільних хвостів, що прямо впливають на величину ризик-чутливої метрики процесної адекватності S_α.

Звідси маємо наступні композиційні обмеження, які впливають на розмір допустимої області G з урахуванням ризик-процесів S_α, причинно-часової узгодженості, темпорально-ресурсної досяжності цілі та вимоги до виконання міжрівневих домовленостей:

$$G = \begin{cases} S_\alpha(x_t) \geq \vartheta_s; \\ \mu(x_t) \leq \varepsilon, \eta(x_t) \leq \Delta; \\ S(x_t) \neq \varnothing; \\ \Xi_{DS}(x_t), \Xi_{SR}(x_t) - \textit{виконані}. \end{cases} \quad (8)$$

де ε, Δ – порогові значення.

Враховуючи (1)–(8), модель інформаційної системи на мобільній платформі можна подати у наступному вигляді:

$$I_{m.p.} = \langle X, U, O, F, H, E, G_t, a_t, c_t B_t, \Xi_{DS}, \Xi_{SR}, \mathrm{M}(x), G \rangle, \quad (9)$$

де O – простір спостережень; $F : X \times U \times E \to X$ – динаміка станів інформаційної системи при (5)–(7); $H : X \times E \to O$ – відображення спостережень, виходячи із другої ознаки динамічних контекстів факторів мобільності.

Окремо варто пояснити деякі елементи моделі, які непрямо виходять з (1). Так, O – простір спостережень варто розглядати як множину всіх вимірів станів інформаційної системи, які доступні політиці управління в момент t замість повного стану x_t. Так як через переривчасту зв'язність і затримки інформаційна система бачить не повний стан, а лише його «проєкцію»:

$$o_t \in O, \quad o_t = H(x_t, e_t) + \psi, \quad (10)$$

де: H – випадкове ядро спостережень від стану x_t та впливів середовища e_t до спостережуваних величин; ψ – пропуски, які дають неповноцінну картину стану системи.

До складу o_t в моделі (9) входять оцінки бюджетів ресурсів, індикатори стану процесів, показники причинно-часової узгодженості, вікна доступу та місткості логічних каналів, часові мітки спостережень – тому у загальному вигляді O можна формалізувати як:

$$O = O_D \times O_S \times O_R \times \{0,1\}^{|E|} \times \mathbb{R}_+^{|E|} \times \{0,1\}^p, \quad (11)$$

а статистичний зв'язок задає ядро спостережень

$$\mathbb{P}(o_t \in \cdot \mid x_t, e_t) = O(\cdot \mid x_t, e_t), \quad (12)$$

яке враховує пропуски, які дають неповноцінну картину стану системи. Якщо спостереження стають повними (тобто o_t містить увесь x_t), задача зводиться до класу класичних задач, в яких ухвалення рішення є таким, в якому наслідки є частково випадковими, а частково контрольовані системою, яка ухвалює рішення. В нашому випадку – у мобільному середовищі – задачі стоять саме з частковою спостережуваністю.

Інший компонент моделі (9) $\mathrm{M}(x)$ є вектором індикаторів живучості інформаційної системи на мобільній платформі та визначається, виходячи з (8) як:

$$\mathrm{M}(x) = (S_\alpha(x), C(x), F(x)), \quad (13)$$

де кожен елемент відображає окремий аспект підтримання критичних процесів інформаційної системи у мобільному середовищі.

Так, $S_\alpha(x)$ – індикатор ризик-чутливої процесної адекватності, який вимірює наскільки безпечний «хвіст» втрат процесної якості для мінімального набору критичних процесів інформаційної системи Ω. Значення розраховується, у два етапи. Спочатку визначається дефіцит SLO для процесів:

$$\varpi_S(x) = \sum_{s \in \Omega} w_s \underbrace{\max\left\{0, \frac{m_s(x) - g_s}{g_s}\right\}}_{\textit{нормований надлишок над ціллю } g_s}, \ \sum w_s = 1, \quad (14)$$

де $m_s(x)$ – фактичний індикатор (затримка, втрата тощо); g_s – власне, ціль.

Далі застосовується відомий апарат CVaR [23] як спосіб визначення умовного математичного сподівання в хвості рівня α:

$$S\alpha(x) := -CVa\mathrm{R}_\alpha[\varpi_S(x)]. \quad (15)$$

У прикладній площині, чим більше $S_\alpha(x)$, тим менший «тяжкохвостий» ризик зупинки процесу.

У (13) $C(x)$ – індикатор причинно-часової консистентності даних, який вимірює узгодженість порядку подій і актуальність даних за переривчастої зв'язності у процесі виконання інформаційною системою основної функції. Індикатор розраховується як комбінація двох складових μ та η. Виходячи із того, що $\mu(x) \in [0, 1]$, а $\eta(x) \geq 0$, то доцільно інтерпретувати $C(x)$ як зважену композицію з нормуванням по η:

$$C(x) = \lambda\mu(x) + (1 - \lambda)\varphi(\eta(x)), \quad \varphi(\eta(x)) = \min\left\{1, \frac{\eta(x)}{\Delta}\right\}, \quad \lambda[0,1]. \quad (16)$$

У прикладній площині, чим менше $C(x)$, тим більш узгодженіші дані між собою.

Третій індикатор у (13) – $F(x)$ – часово-ресурсна здійсненність політик, який встановлює чи існує реальний розклад виконання поточних політик елементом інформаційної системи у рамках часових обмежень і доступних бюджетів (4). Пропонується два способи розрахунку значення індикатору – булевий та ступеневий. У першому випадку маємо $F(x) = 1\{S(x) \neq \varnothing\}$. У другому: $F(x) = \max_{\sigma \in S(x)} \xi(\sigma)$, де $\xi \geq 0$ – мінімальний запас по бюджетах серед усіх задач поточної функції інформаційної системи.

Індикатор $C(x)$ може мати наступні значення:

– $F(x) > 0$ – політика може провадитися (є запас ресурсу);
– $F(x) = 0$ – політика може виконуватися (немає запасу ресурсу);
– $F(x) < 0$ або $F(x) = 0$ у булевому стані – політика не може виконуватися.

Аксіоматичний базис живучості та інформаційної системи на мобільній платформі та базові властивості. Далі доцільно зафіксувати логіко-математичні припущення для розробленої моделі інформаційної технології, на основі яких надалі визначаються допустимі траєкторії її функціонування та ядро живучості:

1) на рівні даних (3) задано часові мітки і відношення часткового порядку, тому жодна операція під час функціонування інформаційної системи не може індукувати ретроспективний вплив;

2) спостереження (10) для мобільних платформ є неповними та потенційно застарілими, тому політики u_t мають бути робастними до ψ;

3) середовище E породжує динамічний логічний граф (перший фактор мобільності) з бінарною доступністю a_t та обсягами місткості c_t, причому розриви зв'язності дозволені, а їх вплив відбивається виключно в елементах інформаційної системи;

4) існує мінімальний набір процесів, без якого цільова функція інформаційної системи не виконується. Кожен $s \in \Omega$ має ціль g_s та індикатор $m_s(x)$;

5) при фіксованих x^S, x^D невід'ємне збільшення бюджетів (4) не погіршує індикатори $m_s(x)$ та не збільшує μ, h;

6) ризик процесної деградації оцінюється на процесному рівні через міру CVaR дефіциту SLO, а параметр $\alpha \in (0, 1)$ задає глибину «тяжкого хвоста»;

7) для критичних процесів визначено частку порушень μ, η з допустимими порогами ε, Δ, які належать до вимог Q;

8) для поточного стану інформаційної системи x існує множина $S(x)$ виконання політик у часових обмеженнях та бюджетах (4). Вимога досяжності виконання основної функції інформаційної системи є обов'язковою;

9) порушення інваріантів узгодження Ξ_{DS} та Ξ_{SR} виводить стан інформаційної системи за межі допустимої області G.

Серед базових властивостей, які випливають із вищенаведеного, є:

1) властивість монотонності по ресурсам, яка пояснюється таким чином, що якщо $x, y \in X$ однакові на X_D, X_S та $B_t^x \leq B_t^y$ покомпетентно, тоді $S_\alpha(y) \geq S_\alpha(x)$, $C(y) \leq C(x)$, $F(y) \geq F(x)$;

2) властивість композиційності рівнів, яка пояснюється таким чином, що узгоджене покращення будь-якого рівня (виконання узгоджень Ξ_{DS}, Ξ_{SR}) не може вивести стан інформаційної системи за межі G;

3) властивість інваріантності станів інформаційної системи до коректних політик, яка пояснюється таким чином, що якщо для стану $x \in G$ існує політика, що не порушує Ξ_{DS}, Ξ_{SR} і підтримує (13) у межах порогових значень, то траєкторія не покидає G попри переривчастість a_t та варіації c_t.

Формалізація класу допустимих траєкторій моделі та ядра живучості. Подальша робота побудована у руслі визначення траєкторій стану інформаційної системи на мобільній платформі, які вважаються допустимими (тобто такими, що зберігають живучість з урахуванням $M(x)$ (13), Ξ_{DS}, Ξ_{SR}) та формалізації множини початкових станів запропонованої моделі, із яких існує політика, що утримує інформаційну систему в допустимій області попри переривчастість і збурення.

Нехай $x_t = (x_t^D, x_t^S, x_t^R) \in X_D \times X_S \times X_R$ – стан інформаційної системи у момент часу t; $o_t = H(x_t, e_t) \in O$ – стан спостереження (11); $u_t = \pi(o_{0:t}) \in U$ – причинна дія політики π, а середовище породжує збурення e_t (включаючи динаміку a_t та c_t). Позначимо допустиму область:

$$G = \{x \in X : S_\alpha(x) \geq \vartheta_S, C(x) \leq \vartheta_C, F(x) \geq \vartheta_F\}, \quad \textit{якщо } \Xi_{DS}(x), \Xi_{SR}(x) - \textit{виконані}. \tag{17}$$

Послідовність станів інформаційної системи $\{x_t\}_{t \in \mathbb{N}}$, згенерована динамікою $x_{t+1} = F(x_t, u_t, e_t)$ під політикою π називається допустимою, якщо за обраним типом гарантій виконується одна з умов:

– умова робастної допустимості $x_t \in G$ для всіх t для будь-яких збурень e_t з допустимого класу E;
– умова ймовірнісної допустимості (із рівнем довіри $1 - \varepsilon$) при

$$\mathbb{P}\{x_t \in G \ \forall \ t\} \geq 1 - \varepsilon. \tag{18}$$

У подальшому в пропонується використовувати робастну версію умов у якості консервативного критерію. Це обґрунтовується тим, що ймовірнісна умова дозволяє контролювати ризики тільки на рівні прийнятної ε.

Важливо, що на процесному рівні можуть існувати режими функціонування інформаційної системи $m_t \in M$ (номінальний, понижений або аварійний) з вказаними правилами переходів. Допустимість переходів (17) не забороняє здійснювати переходи в уже деградовані режими, якщо виконується (8) і зберігається мінімальний критичний зріз у відповідності до Ω.

Таким чином, маємо означення ядра живучості як множини всіх початкових станів, з яких існує причинна політика, здатна утримувати систему всередині G (робастно або з рівнем довіри 1 – ε):

$$K^{v}_{robust} = \left\{ x \in X \mid \exists \pi \forall \left\{ e_t \right\} \subset E : x_t \in G \forall t, \quad x_{t+1} = F\left(x_t \pi(o_{0:t}), e_t \right) \right\}, \tag{19}$$

$$K^{v}_{\varepsilon} = \left\{ x \in X \mid \exists \pi : \mathbb{P}_{\pi} \left\{ x_t \in G \forall t \right\} \geq 1 - \varepsilon \right\}. \tag{20}$$

Операторна побудова (19) та (20) дозволить формалізувати простий спосіб обчислити, у яких станах інформаційна система гарантовано зберігає живучість. Така побудова перетворює логіку утримання інформаційної системи у допустимій області на чітку процедуру з формальними гарантіями, коли інваріантність і робастність фіксуються як стала точка ітерацій з «кроком назад». Такий підхід уніфікує перевірку допустимих траєкторій для різних сценаріїв мобільності й збурень і служить базою для подальшого синтезу політик, бо такий підхід відразу показує варіанти, при яких функціонування інформаційної системи можливе, а при яких – ні.

Нехай, оператори над підмножинами $\mathrm{A} \in X$ мають наступний вигляд відповідно до (19) та (20):

$$\Upsilon_{robust}(\mathrm{A}) := \left\{ x \in G \mid \exists u \in U(x) : \forall e \in E, \; F(x) \geq \vartheta_F, \quad S_\alpha(x) \geq \vartheta_S, \; C(x) \leq \vartheta_C, \; F(x,u,e) \in \mathrm{A} \right\}. \tag{21}$$

$$\Upsilon_{\varepsilon}(\mathrm{A}) := \left\{ x \in G \mid \exists u \in U(x) : \mathbb{P}\left(F(x,u,e) \in \mathrm{A} \wedge S_\alpha \geq \vartheta_S \wedge C \leq \vartheta_C \wedge F \geq \vartheta_F \right) \geq 1 - \varepsilon \right\}. \tag{22}$$

Тоді найбільша інваріантна підмножина G щодо Υ є фіксованою точкою:

$$K^{v}_{robust} = \bigcap_{k \geq 0} \Upsilon^{k}_{robust}(G), \quad K^{v}_{\varepsilon} = \bigcap_{k \geq 0} \Upsilon^{k}_{\varepsilon}(G).$$

Практично, маємо ітеративне звуження G «кроком назад», тобто відкидаємо стани інформаційної системи, з яких навіть найкраща дія не гарантує повернення в A з дотриманням умов (8).

Далі доцільно провести композиційні апроксимації, які трансформують задачу обчислення ядра живучості обчислюваною в реальних масштабах, тобто замість перевірки усього стану інформаційної системи, на що об'єктивно не вистачить часу в умовах мобільності платформи, на якій функціонує ця система, можна швидко перевірити прості локальні умови на рівнях (3). Така перевірка однозначно дасть об'єктивні внутрішні оцінки ядра живучості, придатні для прийняття швидких рішень щодо корекції стану інформаційної системи. Зазначений підхід є гнучким в контексті того, що відразу очевидно, який саме критерій не задовольняє умов функціонування інформаційної системи, а відповідно, і де має спрацювати корекція.

Для цього необхідно ввести спочатку три локальні множини:

$$K_S = \left\{ x : S_\alpha(x) \geq \vartheta_S \right\};$$

$$K_D = \left\{ x : C(x) \leq \vartheta_C \right\};$$

$$K_R = \left\{ x : F(x) \geq \vartheta_F \wedge \left(\Xi_{DS}, \Xi_{SR} - \textit{виконані} \right) \right\}.$$

Тоді:

$$K^V := \left(K_R \cap K_D \cap K_S \right) \cap \textit{узгодження потоків із } a_t, c_t. \tag{23}$$

Маємо внутрішню оцінку ядра живучості (23), яка є початковою множиною для ітерацій Υ. Відповідно, запас живучості можна формалізувати як:

$$\Gamma = \lim_{k^V \to 0^+} \left\{ S_\alpha(x) - \vartheta_S - k^V, \vartheta_C - k^V - C(x), F(x) - \vartheta_F - k^V \right\}, \; k^V \in K^V, \tag{24}$$

де значення Γ, яке більше 0, означає, що x лежить в межах K^V, а якщо Γ = 0, то на межі відсутності зазначеного запасу живучості.

Згідно з результатами проведеного аналізу визначено, що допустимі траєкторії – це напрями функціонування інформаційної системи, де критичні процеси Ω зберігають адекватність навіть за наявності переривчатості. Ядро живучості інформаційної системи формалізує області станів, із якої це принципово можна здійснювати завдяки наявності політик, що узгоджують ресурси, процеси та дані (через Ξ_{DS}, Ξ_{SR}). Включення ризику через S_α робить ядро живучості ризик-усвідомленим, причому рідкісні впливи, на кшталт, «тяжких хвостів» враховуються в самій дефініції допустимості.

Багатокритеріальні показники та цільова функція живучості за ресурсно-часових обмежень. Далі в дослідженні буде сформовано узгоджені способи агрегування таких показників як ризик-чутлива адекватність

процесів (реакція на «тяжкі хвости»), причинно-часова консистентність даних (переривчастість) та часово-ресурсна здійсненність політик (у межах бюджетів і часових обмежень) – у цільову функцію живучості для оцінювання станів і режимів та порівняння політик функціонування інформаційної системи на мобільній платформі.

Щоб уникнути дисбалансу у інтерпретуванні величин, необхідно виконати ряд перетворень індикаторів (13) до порогу [0,1]:

$$\tilde{S}(x) := \frac{1}{1+\mathrm{CVaR}_{\alpha}\left[\varpi_S(x)\right]} \in (0,1],$$

$$\tilde{C}(x) := 1-\left(\lambda\mu(x)+(1-\lambda)\varphi(\eta(x))\right) \in [0,1],$$

$$\tilde{F}(x) := \begin{cases} 1, & S(x) \neq \varnothing, \quad ma \quad \max\limits_{\sigma \in S(x)} \xi(\sigma) \geq \eta, \\ \dfrac{1}{1+\max\left\{0, \eta - \max\limits_{\sigma} \xi(\sigma)\right\}}, & \textit{інакше.} \end{cases}$$

Маємо:

$$\tilde{\mathrm{M}}(x) = \left(\tilde{S}_{\alpha}(x), \tilde{C}(x), \tilde{F}(x)\right) \in [0,1]^3. \tag{25}$$

Далі – згортаємо вектор нормованих показників (25) у індекси живучості:

– індекс найслабшої ланки $J_{\min}(x)$:

$$J_{\min}(x) := \min\left\{\tilde{S}(x), \tilde{C}(x), \tilde{F}(x)\right\}, \tag{26}$$

який показує «вузьке місце» інформаційної системи. Значення індексу визначається найгіршою з трьох нормованих компонент $\tilde{S}, \tilde{C}, \tilde{F}$. Сутність індексу полягає у тому, що жоден сильний компонент не може компенсувати критичну слабкість, тобто, якщо, здійсненність політик задовільна, а дані узгоджені, але при цьому виникає «тяжкий хвіст» процесних втрат (значне падіння $\tilde{S}$), то індекс буде низьким. Відповідно, індекс буде доречним у режимах, в яких порушення будь-якого критерію з вищерозглянутих –неприйнятне. Позитивними практиками є простота інтерпретації та вкрай висока чутливість до ризиків і помилок у на рівні даних. Однак серед мінусів варто зазначити той факт, що індекс може пригнічувати рішення, коли один з трьох нормованих компонент тимчасово просідає, а інші суттєво кращі. Крім цього індекс не дає градації у розрізі того, який поріг наближений до прийнятного, а який – на критичному рівні;

– зважений індекс $J_w(x)$:

$$J_w(x) := w_S\tilde{S}(x) + w_C\tilde{C}(x) + w_F\tilde{F}(x), \tag{27}$$

який дає змогу явно розставити пріоритети між ризиком процесів, консистентністю даних і здійсненністю досяжності цілі інформаційної системи, підібравши ваги w_S, w_C, w_F під профіль основної функції інформаційної системи. Коли потрібно здійснити пріоритезацію між критеріями (наприклад, знизити ризик відмови процесів, пожертвувавши часткою пропускної здатності непершочергових потоків в інформаційній системі) зазначений індекс є найзручніший. Позитивними практиками є гнучкість індексу, плавна реакція, придатність для автоматичного налаштування і швидкого пошуку рішень. Однак індекс має певні обмеження, зокрема, компенсаторний ефект, наприклад, суттєве падіння однієї з трьох нормованих компонент $\tilde{S}, \tilde{C}, \tilde{F}$ може маскуватися високими значеннями інших компонент. У якості обходу цього обмеження, можна поєднувати J_w з пороговими допусками на кожен з компонент, наприклад, перевіряти умови $S_{\alpha} \geq \vartheta_S$, $C \leq \vartheta_C$, $F \geq \vartheta_F$ до агрегування (25);

– послідовний індекс J_l:

$$J_l(x) := \left(1\left\{\tilde{F}(x) \geq \vartheta_F\right\}, 1\left\{\tilde{S}(x) \geq \vartheta_S\right\}, \tilde{C}(x)\right), \tag{28}$$

який використовує жорсткий порядок пріоритетів. Так, спершу здійснюється перевірка на предмет, чи взагалі можлива реалізація політик у часі та наявних бюджетах, далі – перевірка прийнятності процесної адекватності, далі – здійснюється максимізація консистентності даних. Такий підхід застосовний для інформаційних систем на мобільній платформі із жорсткими часовими обмеженнями та основною функцією з мінімально допустимим рівнем якості виконання процесів. Тобто, якщо на певному етапі функціонування інформаційної системи основна місія стає недосяжною для виконання інформаційною системою, то немає сенсу перетягувати інші компоненти за зміною їх пріоритетів, достатньо ініціювати перебудову функціональної моделі інформаційної системи. Позитивними практиками індексу є жорстка узгодженість з операційною логікою, прозорість рішень, відсутність небажаної компенсації. Однак серед недоліків варто зазначити стрибкоподібну поведінку при перетині порогів та, власне, чутливість до вибору порогів ϑ_F, ϑ_S. Також, у мінливих сценаріях без «тяжких хвостів», індекс може бути надто жорстким і відкидати цілком прийнятні компромісні траєкторії перерозподілу ресурсів між компонентами $\tilde{S}, \tilde{C}, \tilde{F}$.

Агрегування (25) застосовується лише до станів у допустимій області:

$$x \in G \Leftrightarrow \begin{cases} S_\alpha(x) \geq \vartheta_S, \\ C(x) \leq \vartheta_C, \\ F(x) \geq \vartheta_F, \\ \Xi_{DS}(x), \Xi_{SR}(x) - \textit{виконанані}, \\ \textit{потоки узгоджені з } a_t, c_t, \\ \textit{бюджети } B_t \textit{ дотримано}. \end{cases} \tag{29}$$

Таким чином, $J_{\min}$, J_w, J_l як індекси живучості, по суті, є оціночними функціоналами якості всередині G, тому вихід характеристик інформаційної системи за G трактується як нульова живучість інформаційної платформи на мобільній платформі.

Висновки

В роботі вперше представлено багаторівневу модель інформаційної системи на мобільній платформі, яка одночасно і в одному формалізмі враховує хвостато-ризикову деградацію процесів через CVaR-оцінку дефіциту SLO, причинно-часову консистентність даних під переривчастою зв'язністю мобільної платформи, часово-ресурсну здійсненність політик у межах динамічних бюджетів і «вікон доступності», причому міжрівневі взаємовідносини та операторна побудова ядра живучості забезпечують композиційні гарантії живучості інформаційної системи. На відміну від існуючих підходів, які розглядають ці аспекти окремо (мережно-операційні оптимізації та класичні метрики готовності), запропонована модель інтегрує їх у спільний простір станів і критеріїв та надає узгоджену методику оцінювання станів за індексами живучості.

Практична цінність розробленої моделі полягає у наданні цілісного, операційно придатного апарату для управління інформаційною системою на мобільній платформі, який поєднує ризик-орієнтоване оцінювання процесів, контроль причинно-часової узгодженості даних та перевірку здійсненності політик у наявних ресурсно-часових межах. Модель забезпечує формалізовану область допустимих станів і ядро живучості, що дозволяє завчасно виявляти критичні процесні точки, обирати керовані режими деградації і раціонально перерозподіляти ресурси для підтримання критичних процесів. Індексна діагностика стану дає прозорий механізм пріоритизації між якістю процесів, консистентністю даних і плановою здійсненністю політик, а композиційні перевірки роблять оцінювання швидким і масштабованим для застосування в режимі реального часу. Завдяки апаратній незалежності та міжрівневим погоджувальним механізмам модель слугує основою для регламентів експлуатації, сценарного тестування і перевірки вимог живучості у різнорідних інформаційних системах на мобільних платформах.

Список використаної літератури

1. Компанієць О. М. Інформаційна технологія адаптивного управління роєм безпілотних літальних апаратів в антагоністичному середовищі. *Системи обробки інформації*. 2025. № 4 (179). С. 43–48. URL: https://doi.org/10.30748/soi.2024.179.04

2. Дуднік А., Тищенко А., Яременко Д. Огляд сучасних технічних та програмних рішень для управління БПЛА. *Information Technology And Society*. 2024. № 4 (15). С. 44–50. URL: https://doi.org/10.32689/maup.it.2024.4.8

3. Технологія забезпечення живучості територіально-розподілених інформаційних комп'ютерних систем в єдиному інформаційному просторі / О. Г. Додонов та ін. *Реєстрація, зберігання і обробка даних*. 2024. Т. 26, № 1. С. 121–143. URL: https://doi.org/10.35681/1560-9189.2024.26.1.308659

4. Method of ensuring the survivability of highly mobile computer networks / V. Tkachov et al. *Advanced Information Systems*. 2021. Vol. 5, no. 2. P. 159–165. URL: https://doi.org/10.20998/2522-9052.2021.2.24

5. Залужний В. Ф. Показники ефективності (якості) комплексної системи забезпечення живучості розподілених автоматизованих систем організаційного управління силами та засобами. *Реєстрація, зберігання і обробка даних*. 2025. Т. 27, № 1. С. 42–50. URL: https://doi.org/10.35681/1560-9189.2025.27.1.335693

6. 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, 5–7 October 2021. 2021. URL: https://doi.org/10.1109/picst54195.2021.9772202

7. Flying Sensor and Edge Network-Based Advanced Air Mobility Systems: Reliability Analysis and Applications for Urban Monitoring / H. Fesenko et al. *Drones*. 2023. Vol. 7, no. 7. P. 409. URL: https://doi.org/10.3390/drones7070409

8. Shaiekhova I. F., Oliinyk Y. O. Approach to developing architecture of a heterogeneous multicomputer task planning system. *Applied Questions of Mathematical Modeling*. 2021. Vol. 4, no. 2.1. URL: https://doi.org/10.32782/kntu2618-0340/2021.4.2.1.29

9. Terenyk D., Kharchenko V. Choosing strategies for deployment and ensuring the reliability of a UAV swarm to support communications in destruction conditions. *Innovative Technologies and Scientific Solutions For Industries*. 2024. No. 3 (29). P. 91–103. URL: https://doi.org/10.30837/2522-9818.2024.3.091

10. Додонов О. Г., Горбачик О. С., Кузнєцова М. Г. Підвищення безпеки критичних інфраструктур засобами автоматизованих систем організаційного управління. *Реєстрація, зберігання і обробка даних*. 2022. Т. 24, № 1. С. 74–81. URL: https://doi.org/10.35681/1560-9189.2022.24.1.262817

11. Додонов О. Г., Ланде Д. В. Мережева модель структурної живучості. *Реєстрація, зберігання і обробка даних*. 2021. Т. 23, № 1. С. 15–22. URL: https://doi.org/10.35681/1560-9189.2021.23.1.235075

12. Афанасьєва А. М., Ткачов В. М. Порівняльний аналіз методів побудови високомобільних комп'ютерних мереж на базі рою БПЛА. *Вісник Херсонського національного технічного університету*. 2024. № 1(88). С. 191–196. URL: https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2024.1.26

13. Коваленко А. А., Кучук Г. А., Ткачов В. М. метод забезпечення живучості комп'ютерної мережі на основі VPN-тунелювання. *Системи управління, навігації та зв'язку*. Збірник наукових праць. 2021. Т. 1, № 63. С. 90–95. URL: https://doi.org/10.26906/sunz.2021.1.090

14. Reliability Analysis for Dependent Competing Failure System Considering Degradation Rate and Hard Failure Threshold Changes / Y. Niu et al. *2024 3rd International Conference on Innovations and Development of Information Technologies and Robotics (IDITR)*, Hunghom, Hong Kong, 23–25 May 2024. 2024. URL: https://doi.org/10.1109/iditr62018.2024.10554307

15. Searching for heavy-tailed probability distributions for modeling real-world complex networks / T. Chakraborty et al. *IEEE Access*. 2022. P. 1. URL: https://doi.org/10.1109/access.2022.3218631

16. Chen J., Ng M. K., Wang D. Quantizing Heavy-tailed Data in Statistical Estimation: (Near) Minimax Rates, Covariate Quantization, and Uniform Recovery. *IEEE Transactions on Information Theory*. 2023. P. 1. URL: https://doi.org/10.1109/tit.2023.3329240

17. Optimization of drone base station locations and mobile charging drone routing for post-disaster communication / F. Avishan et al. *Computers & Operations Research*. 2025. P. 107206. URL: https://doi.org/10.1016/j.cor.2025.107206

18. Risk-Aware Energy Scheduling for Edge Computing with Microgrid: A Multi-Agent Deep Reinforcement Learning Approach / M. S. Munir et al. *IEEE Transactions on Network and Service Management*. 2021. P. 1. URL: https://doi.org/10.1109/tnsm.2021.3049381

19. R. Kelly Rainer; Brad Prince. Introduction to Information Systems. *Wiley Global Education US*, 2021. 432 c.

20. Schneider C., Hashim M., Valacich J. Information Systems Today: Managing in the Digital World. *Pearson Education*, 2022. 538 c.

21. Mathematical modeling of the availability of the information system for critical use to optimize control of its communication capabilities / O. V. Bisikalo et al. *International Journal of Sensors, Wireless Communications and Control*. 2020. Vol. 10. URL: https://doi.org/10.2174/2210327910999201009163958

22. Xiaofeng Li and Chanle Wu. Building a new-generation learning resources management system based on SLO and SOA technology. *2010 2nd International Conference on Computer Engineering and Technology*, Chengdu, 2010, pp. V3-189-V3-193, doi: 10.1109/ICCET.2010.5485827

23. Decentralized coordination of intelligent system of systems under partial observability / H. Yuan et al. *Advanced Engineering Informatics*. 2025. Vol. 65. P. 103286. URL: https://doi.org/10.1016/j.aei.2025.103286

24. Grefen, Paul W. P. J. Business Information System Architecture. *Independently published*. 2025. 233 c.

References

1. Kompaniyets O. M. (2025). Informatsiyna tekhnolohiya adaptyvnoho upravlinnya royem bezpilotnykh lital′nykh aparativ v antahonistychnomu seredovyshchi [Information technology for adaptive control of uav swarms in antagonistic environments]. *Systemy obrobky informatsiyi*. (4 (179)), pp. 43–48. https://doi.org/10.30748/soi.2024.179.04

2. Dudnik, A., Tyshchenko, O., & Yaremenko, D. (2024). Ohlyad suchasnykh tekhnichnykh ta prohramnykh rishen′ dlya upravlinnya BPLA [Overview of modern technical and software solutions for UAV control]. *Information Technology And Society*, (4 (15)), pp. 44–50. https://doi.org/10.32689/maup.it.2024.4.8

3. Dodonov, O. H., Putyatin, V. H., Dodonov, V. O., Kutsenko, S. A., Hermanyuk, A. P., Izvaryn, I. V., & Kravchuk, K. O. (2024). Tekhnolohiya zabezpechennya zhyvuchosti terytorial′no-rozpodilenykh informatsiynykh komp″yuternykh system v yedynomu informatsiynomu prostori [Technology for ensuring the survivability of geographically distributed information computer systems in a single information space]. *Reyestratsiya, zberihannya i obrobka danykh*, 26(1), 121–143. https://doi.org/10.35681/1560-9189.2024.26.1.308659

4. Tkachov, V., Kovalenko, A., Kuchuk, H., & Ni, I. (2021). Method of ensuring the survivability of highly mobile computer networks. *Advanced Information Systems*, 5(2), 159–165. https://doi.org/10.20998/2522-9052.2021.2.24

5. Zaluzhnyy, V. F. (2025). Pokaznyky efektyvnosti (yakosti) kompleksnoyi systemy zabezpechennya zhyvuchosti rozpodilenykh avtomatyzovanykh system orhanizatsiynoho upravlinnya sylamy ta zasobamy [Indicators of efficiency (quality) of a comprehensive system for ensuring the survivability of distributed automated systems for organizational management of forces and means]. *Reyestratsiya, zberihannya i obrobka danykh*, 27(1), 42–50. https://doi.org/10.35681/1560-9189.2025.27.1.335693

6. Tkachov, V., Hunko, M., Morozova, O., Tetskyi, A., & Nicheporuk, A. (2021). Method to Determine Fault-Tolerant Performance Probability of High-Survivability Computer Network based on Mobile Platform. *2021 IEEE 8th International Conference on Problems of Infocommunications, Science and Technology (PIC S&T)*. IEEE. https://doi.org/10.1109/picst54195.2021.9772202

7. Fesenko, H., Illiashenko, O., Kharchenko, V., Kliushnikov, I., Morozova, O., Sachenko, A., & Skorobohatko, S. (2023). Flying Sensor and Edge Network-Based Advanced Air Mobility Systems: Reliability Analysis and Applications for Urban Monitoring. *Drones*, 7(7), 409. https://doi.org/10.3390/drones7070409

8. Shaiekhova, I. F., & Oliinyk, Y. O. (2021). Approach to Developing Architecture of a Heterogeneous Multicomputer Task Planning System. *Applied Questions of Mathematical Modeling*, 4(2.1). https://doi.org/10.32782/kntu2618-0340/2021.4.2.1.29

9. Terenyk, D., & Kharchenko, V. (2024). Choosing strategies for deployment and ensuring the reliability of a UAV swarm to support communications in destruction conditions. *Innovative Technologies And Scientific Solutions For Industrie* S, (3 (29)), 91–103. https://doi.org/10.30837/2522-9818.2024.3.091

10. Dodonov, O. H., Horbachyk, O. S., & Kuznyetsova, M. H. (2022). Pidvyshchennya bezpeky krytychnykh infrastruktur zasobamy avtomatyzovanykh system orhanizatsiynoho upravlinnya [Improving the security of critical infrastructures through automated organizational management systems]. *Reyestratsiya, zberihannya i obrobka danykh*, 24(1), 74–81. https://doi.org/10.35681/1560-9189.2022.24.1.262817

11. Dodonov, O. H., & Lande, D. V. (2021). Merezheva model′ strukturnoyi zhyvuchosti [Network model of structural survivability]. *Reyestratsiya, zberihannya i obrobka danykh*, 23(1), 15–22. https://doi.org/10.35681/1560-9189.2021.23.1.235075

12. Afanasiyeva, A. M., & Tkachov, V. M. (2024). Porivnyal′nyy analiz metodiv pobudovy vysokomobil′nykh komp″yuternykh merezh na bazi royu BPLA [Comparative analysis of methods for building high-mobility computer networks based on a swarm OF UAVS]. *Visnyk Khersons'koho natsional'noho tekhnichnoho universytetu*, (1(88)), 191–196. https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2024.1.26

13. Kovalenko, A., Kuchuk, H., & Tkachov, V. (2021). Metod zabezpechennya zhyvuchosti komp″yuternoyi merezhi na osnovi VPN-tunelyuvannya [Method of ensuring the viability of a computer network based on VPN tunnelling]. *Systemy upravlinnya, navihatsiyi ta zv"yazku. Zbirnyk naukovykh prats'*, 1(63), 90–95. https://doi.org/10.26906/sunz.2021.1.090

14. Niu, Y., Wang, X., Wang, B., & Wu, J. (2024). Reliability Analysis for Dependent Competing Failure System Considering Degradation Rate and Hard Failure Threshold Changes. *2024 3rd International Conference on Innovations and Development of Information Technologies and Robotics (IDITR)*. IEEE. https://doi.org/10.1109/iditr62018.2024.10554307

15. Chakraborty, T., Chattopadhyay, S., Das, S., Kumar, U., & Senthilnath, J. (2022). Searching for heavy-tailed probability distributions for modeling real-world complex networks. *IEEE Access*, 1. https://doi.org/10.1109/access.2022.3218631

16. Chen, J., Ng, M. K., & Wang, D. (2023). Quantizing Heavy-tailed Data in Statistical Estimation: (Near) Minimax Rates, Covariate Quantization, and Uniform Recovery. *IEEE Transactions on Information Theory*, 1. https://doi.org/10.1109/tit.2023.3329240

17. Avishan, F., Karasu, M. B., Çap, M., & Yanıkoğlu, İ. (2025). Optimization of drone base station locations and mobile charging drone routing for post-disaster communication. *Computers & Operations Research*, 107206. https://doi.org/10.1016/j.cor.2025.107206

18. Munir, M. S., Abedin, S. F., Tran, N. H., Han, Z., Huh, E.-N., & Hong, C. S. (2021). Risk-Aware Energy Scheduling for Edge Computing with Microgrid: A Multi-Agent Deep Reinforcement Learning Approach. *IEEE Transactions on Network and Service Management*, 1. https://doi.org/10.1109/tnsm.2021.3049381

19. R. Kelly Rainer, Brad Prince (2021). Introduction to Information Systems. *Wiley Global Education US*.

20. Schneider, C., Hashim, M., & Valacich, J. (2022). Information Systems Today: Managing in the Digital World. *Pearson Education*.

21. Bisikalo, O. V., Kovtun, V. V., Kovtun, O. V., & Danylchuk, O. M. (2020). Mathematical modeling of the availability of the information system for critical use to optimize control of its communication capabilities. *International Journal of Sensors, Wireless Communications and Control*, 10. https://doi.org/10.2174/2210327910999201009163958

22. Xiaofeng Li & Chanle Wu. (2010). Building a new-generation learning resources management system based on SLO and SOA technology. *2010 2nd International Conference on Computer Engineering and Technology*. IEEE. https://doi.org/10.1109/iccet.2010.5485827

23. Yuan, H., Ren, B., Chen, T., & Luo, X. (2025). Decentralized coordination of intelligent system of systems under partial observability. *Advanced Engineering Informatics*, 65, 103286. https://doi.org/10.1016/j.aei.2025.103286

24. Grefen, Paul W. P. J. (2025). Business Information System Architecture. *Independently published*.

Дата першого надходження рукопису до видання: 29.09.2025
Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 23.10.2025
Дата публікації: 28.11.2025