



UDC 004. [03+04+056+75+9]:355.4

Н. Р. Балко¹, Ю. І. Грицюк^{1,2}

¹ Національний лісотехнічний університет України, м. Львів, Україна

² Національний університет "Львівська політехніка", м. Львів, Україна

АНАЛІЗ АДАПТИВНИХ СТРАТЕГІЙ КЕШУВАННЯ ДАНИХ У ТАКТИЧНИХ ІНФОРМАЦІЙНИХ МЕРЕЖАХ

З'ясовано, що забезпечення доступності критично важливих даних у тактичних мережах C4ISR за умов впливу засобів радіоелектронної боротьби (РЕБ) залишається невирішеною архітектурною проблемою розподілених систем реального часу. Проведене наше дослідження застосовує систематичний багатокритеріальний аналітичний апарат, заснований на формалізмі CAP-теореми, аналізі PACELC-компромісів та спеціально розробленій системі метрик живучості мілітарних систем – для порівняльного оцінювання трьох класів механізмів кешування даних: класичних алгоритмів витіснення кешованого об'єкта (LRU, LFU, ARC, W-TinyLFU), корпоративних платформ класу IMDG (англ. *In-Memory Data Grid*) та фреймворків тактичних граничних обчислень для середовищ типу DIL (англ. *Disconnected, Interrupted, Low-Bandwidth*). Виконаний аналіз алгоритмів витіснення кешованого об'єкта доводить, що класичні алгоритми демонструють системну "семантичну сліпоту" (semantic blindness) – нездатність розрізняти тактичний пріоритет даних спричиняє витіснення бойових наказів на користь фонових телеметрії; це явище формалізовано у роботі як "семантична катастрофа витіснення кешованого об'єкта". Встановлено, що IMDG-системи, що покладаються на протоколи консенсусу Raft та Paxos, функціонально паралізуються внаслідок фрагментації мережі: за рівня втрати пакетів понад 5 % (типовому за умов РЕБ) такі системи витрачають до 40 % пропускної здатності магістральних ліній на службовий трафік виборів лідера, блокуючи всі операції запису на ізольованих вузлах через CP-модель. Як наслідок, обидва підходи до управління пам'яттю не задовольняють вимогу AP-моделі (Availability + Partition Tolerance), аксіоматичну для тактичних командних пунктів. Запропоновано парадигму адаптивного кешування даних на основі динамічної цінності інформації DVoI (англ. *Dynamic Value of Information*) для подолання виявлених обмежень, а саме: тривимірну скорингову модель, що інтегрує семантичний ранг корисного навантаження (Sem), коефіцієнт деградації РЕБ (EW_factor) та місійний контекст (Mission), керовану чотирирежимним автоматом станів системи без зовнішнього мережевого консенсусу. Практичне значення роботи полягає у можливості застосування формалізованої системи оцінювання кеш-систем як складових мілітарних програм та на архітектурному кресленні DVoI, придатному для інтеграції у перспективні розгортання тактичних мереж C4ISR.

Ключові слова: семантична сліпота витіснення кешованого об'єкта; динамічна цінність інформації; живучість розподілених вузлів; консенсус у нестабільних мережах; тактична мережа C4ISR; граничні обчислення реального часу.

Вступ / Introduction

Зростання складності сучасних операцій на театрі воєнних дій супроводжується експоненційним збільшенням обсягів цифрових даних, що циркулюють у тактичних інформаційних мережах. Системи класу C4ISR (англ. *Command, Control, Communications, Computers, Intelligence, Surveillance, and Reconnaissance* – командування, управління, зв'язок, комп'ютери, розвідка, спостереження та рекогноситування) інтегрують різноманітні потоки: розвідувальні знімки, відео з безпілотних літальних апаратів (БПЛА), дані цілевказання, координати підрозділів BFT (англ. *Blue Force Tracking*) та низькопріоритетну системну телеметрію. Ефективне диференційоване управління цими потоками даних за умов лімітних ресурсних обмежень є ключовою архітектурною проблемою сучасних військових інформаційних технологій.

Під терміном "кешування" будемо розуміти процес тимчасового збереження копій даних у швидкісному сховищі (кеші), щоб забезпечити майже миттєвий доступ до них у разі повторних запитів [14, 19]. Головна мета цієї технології полягає у зменшенні часу відповіді системи, мінімізації навантаження на основну базу даних або сервер, а також в економії мережевого трафіку.

У глобальній дослідницькій літературі питання оптимізації доступу до даних за допомогою механізмів кешування даних у цивільних архітектурах мережі охоплено ґрунтовно. Фундаментальні алгоритми витіснення кешованого об'єкта – LRU (англ. *Least Recently Used*), LFU (англ. *Least Frequently Used*), ARC (англ. *Adaptive Replacement Cache*) [31] – а також корпоративні In-Memory Data Grid рішення (Redis, Hazelcast, Apache Ignite) [5] демонструють видатну продуктивність і субмілісекундні затримки у стабільних хмарних і мікросервісних

© Copyright 2026 by the author(s)

Балко Назарій Романович, аспірант, кафедра комп'ютерних наук.

Email: 25balko.n@ntu.lviv.ua; <https://orcid.org/0009-0007-2583-5812>

Грицюк Юрій Іванович, д-р техн. наук, професор, кафедра інженерії програмного забезпечення.

Email: yurii.i.hrytsiuk@lpnu.ua; <https://orcid.org/0000-0001-8183-3466>

Цитування за ДСТУ: Балко Н. Р., Грицюк Ю. І. Аналіз адаптивних стратегій кешування даних у тактичних інформаційних мережах. Науковий вісник НЛТУ України. 2026, т. 36, № 4. С. 67–78.

Citation APA: Balko, N. R., & Hrytsiuk, Yu. I. Analysis of adaptive data caching strategies in tactical information networks. *Scientific Bulletin of UNFU*, 36(4), 67–78. <https://doi.org/10.36930/40360408>

архітектурах мережі. Концепції граничних обчислень (Edge Computing) [23, 24] та туманних обчислень (Fog Computing) [4] дали можливість перемістити обчислювальні потужності до мережевого "краю", що істотно підвищило автономність безпосередніх споживачів.

Однак, між інженерним прогресом у цивільному секторі та реальними потребами тактичних мереж існує принципова архітектурна прірва. Тактичне поле бою є середовищем DIL (англ. *Disconnected, Interrupted, Low-Bandwidth*) [8], де: канали зв'язку зазнають постійного деструктивного впливу ворожих засобів РЕБ; топологія мережі хаотично змінюється внаслідок фізичного переміщення або знищення вузлів; пропускна здатність магістральних ліній може деградувати до одиниць кілобіт на секунду; пріоритетність типів даних може кардинально змінюватися за мілісекунди (наприклад, перехід від режиму розвідки до відбиття штурму). Жоден із наведених класичних механізмів кешування даних не проєктувався з урахуванням цих умов. Понад це, всі вони страждають на те, що у цій роботі позначається як "семантична сліпота" (semantic blindness) – принципова нездатність розрізняти тактичний контекст та пріоритетність збережених об'єктів.

Постановка завдання дослідження. Виявити архітектурні та алгоритмічні обмеження наявних підходів до кешування даних під час їх застосування за умов екстремальної нестабільності зв'язку та гострого дефіциту обчислювальних ресурсів на тактичному рівні управління, а також обґрунтувати концептуальну архітектуру проактивної семантично-адаптивної системи управління кеш-пам'яттю.

Об'єкт дослідження – функціонування механізмів кешування даних у розподілених інформаційних системах тактичного призначення за умов нестабільного мережевого середовища.

Предмет дослідження – методи, алгоритми та стратегії адаптивного кешування даних за умов критично обмеженої пропускної здатності магістральних ліній та динамічної зміни контекстних пріоритетів інформації, що дасть змогу визначити прогалини у вирішенні проблеми адаптивного кешування для тактичних середовищ типу DIL.

Мета роботи – виконати комплексний порівняльний аналіз методів і технологій кешування даних за спеціалізованими критеріями мілітарних систем, що дасть можливість обґрунтувати концепцію застосування VoI-орієнтованої адаптивної системи управління кеш-пам'яттю для тактичної мережі C4ISR.

Для досягнення зазначеної мети визначено такі основні завдання дослідження:

- проаналізувати останні дослідження та публікації щодо адаптивних стратегій кешування даних у тактичних інформаційних мережах, що дасть змогу системно виявити фундаментальні архітектурні та алгоритмічні обмеження класичних підходів до управління пам'яттю за умов деструктивного впливу засобів радіоелектронної боротьби;
- дослідити характер функціонування корпоративних розподілених платформ класу In-Memory Data Grid та оцінити деградацію їхніх характеристик, що дасть можливість довести їхню концептуальну невідповідність жорстким вимогам AP-моделі за CAP-теоремою у середовищах із неминучою фрагментацією мережі;
- математично формалізувати та побудувати багатовимірну проактивну скорингову модель на основі критерію динамічної цінності інформації (DVoI), що забезпечить

контекстне обчислення пріоритетів збереження об'єктів у реальному часі;

- спроектувати компонентну архітектуру менеджера кеш-пам'яті (DVoI-Adaptive Cache Manager) та розробити чотирежимну машину його станів, що забезпечить автоматичний перехід вузла в автономний режим виживання (Survival Mode) без потреби у глобальному мережевому консенсусі.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Ефективне функціонування сучасних тактичних систем класу C4ISR безпосередньо залежить від швидкодії та відмовостійкості розподілених архітектур оброблення даних у реальному часі. Проблема забезпечення живучості та автономності граничних вузлів за умов нестабільного зв'язку (DIL-середовище), деструктивного впливу радіоелектронної боротьби (РЕБ) та ресурсних обмежень перебуває у центрі уваги багатьох провідних дослідників.

У роботі [19] здійснено систематичне картографічне дослідження, в якому розглянуто стратегії кешування в ICN та IoT-середовищах, і встановлено, що домінуючими підходами є кешування на краю мережі (50 %), кешування всередині мережі (25 %) та гібридне кешування (25 %), а серед стратегій визначальну роль відіграють підходи на основі популярності контенту (26 %). Автори підтверджують, що ICN-середовище є перспективною архітектурою, однак усі розглянуті роботи оперують поняттям "популярності" як основним критерієм кешування – жодна з них не розглядає ситуацію, коли статистично "рідкісний" об'єкт є абсолютно критичним для виживання, що є нормою для тактичних командних пунктів C4ISR. Схожу картину фіксує й аналіз [20], де ключовим критерієм виступає соціальна поведінка користувачів. Тоді як комерційний сегмент зосереджений на вподобаннях мас, тактичні мережі вимагають принципово іншого підходу – пріоритет визначається не частотою звернень, а оперативною значущістю об'єкта для поточної місії. Цей концептуальний розрив між логікою комерційного та мілітарного кешування є одним із ключових обґрунтувань наукової актуальності цього дослідження.

У роботі [14] ідентифіковано системні проблеми класичних стратегій заміщення на граничних серверах, зокрема – негайне витіснення кешованого об'єкта після промаху кешу. Платформа, яку запропонували автори, покращує показники, однак оптимізує винятково часові характеристики запитів без механізму врахування семантичного пріоритету об'єкта, що за умов РЕБ може призводити до хибних рішень щодо бойових даних. Подібне обмеження характерне й для підходу на основі нелінійної оптимізації [7], де розв'язується задача максимізації корисності для ієрархії TTL-кешів. Автори знаходять оптимальні таймери витіснення кешованого об'єкта, однак за різкої зміни місії таймер не здатний відреагувати на зовнішній тактичний тригер без повного перерахунку.

Важливим кроком у напрямі подолання реактивності є робота [31], де запропоновано енергоефективне проактивне кешування з мультишляховою маршрутизацією. Концепція проактивності є критичною для тактичних застосувань, однак запропонована модель знову ж таки не враховує динамічної зміни бойового контексту. Концептуально найближчою до ідеї семантичної пріоритизації є праця [17], де запропоновано апаратні

архітектури кешу для систем змішаної критичності (базові станції 5G), які блокують витіснення критичних задач. Незважаючи на підтверджену ефективність, класифікація є двійковою і статичною – відсутня динамічна реструктуризація пріоритетів, не враховується стан радіоелектронної обстановки та не забезпечується AP-модель доступності в разі ізоляції вузла.

Окремий масив досліджень фокусується на кооперативному кешуванні у нестабільних мережах БПЛА (UAV) та супутників. У роботі [32] досліджено спільну оптимізацію процесу кешування, планування траєкторії та розподілу ресурсів у мультиагентних системах БПЛА. Дослідження є актуальним, оскільки БПЛА є ключовим елементом C4ISR-систем, однак підхід потребує стабільного зв'язку між агентами для координації навчання – нездійсненна вимога за умов DIL-середовища. Нарешті, автори роботи [15] пропонують стратегію кооперативного заміщення кешу на основі мультиагентного навчання, проте механізм знову базується на статистиці запитів і не передбачає зовнішнього введення тактичного контексту.

Унаслідок аналізу останніх досліджень та публікацій з'ясовано, що жодна з розглянутих робіт не пропонує рішення, яке б одночасно забезпечувало формалізовану семантичну таксономію пріоритетів об'єктів кешу на основі оперативної значущості для бойової місії, динамічну реструктуризацію черги витіснення кешованого об'єкта в разі зміни місійного контексту (без накопиченої статистики звернень) та гарантовану AP-доступність без зовнішнього мережевого консенсусу – в разі повної ізоляції вузла. Саме усунення цього тривимірного дефіциту є науковою метою пропонованого дослідження, спрямованого на розроблення DVoI-адаптивної парадигми управління кеш-пам'яттю у тактичних системах.

Матеріали та методи дослідження. Для досягнення поставленої мети застосовано комплексний методологічний апарат: системний аналіз – для декомпозиції процесів управління даними за умов ресурсних обмежень, порівняльний аналіз – для верифікації характеристик різних класів кеш-систем та методи концептуального моделювання архітектури програмного забезпечення (англ. *Software Architecture Modeling*) [19], а також теорія масового обслуговування (ТМО) – для моделювання процесів надходження запитів на дані, оцінки затримок (латентності) та ймовірності втрати пакетів. Матеріальною базою дослідження слугували актуальні публікації з репозиторіїв IEEE Xplore, ACM Digital Library та Scopus, технічні специфікації IMDG-систем, архітектурні патерни алгоритмів кешування даних (LRU, LFU, ARC, TinyLFU) [6, 18, 31] та стандарти обміну даними у затримотолерантних мережах DTN (англ. *Delay-Tolerant Networking*) і тактичних хмарних середовищах [7, 8].

Оскільки специфіка функціонування мілітарних систем реального часу унеможливує застосування стандартних цивільних бенчмарків (YCSB, TPC-C), методологічну основу становить аналітичне багатокритеріальне оцінювання на базі фундаментальних законів розподілених обчислень (CAP-теорема, PACELC-принцип) та апробованих патернів живучості ПЗ у критичних інфраструктурах. Для мінімізації похибок аналітичного характеру оцінювання базувалося на фундаментальних формальних теоремах [1, 4, 10] та доведених алгоритмах [15, 19], що дає змогу екстраполювати результати з обґрунтованою точністю.

Результати дослідження та їх обговорення / Research results and their discussion

Дослідження проблематики оптимізації доступу до даних у розподілених системах за концептуальними підходами охоплює три основні напрями: класичні алгоритми витіснення кешованого об'єкта, корпоративні платформи In-Memory Data Grids (IMDG) та системи тактичних граничних обчислень.

Класичні алгоритми витіснення кешованого об'єкта: еволюція та архітектурні обмеження. Фундаментальні роботи в галузі алгоритмів кешування даних [6, 31] детально аналізують застосування LRU та LFU у системах реального часу. Намагаючись подолати базові недоліки цих алгоритмів, зокрема – явище "забруднення кешу" (Cache Pollution) за масового сканування, науковці запропонували гібридні рішення: ARC (Adaptive Replacement Cache) та W-TinyLFU [6]. ARC динамічно балансує між списками "нещодавно використаних" і "часто використаних" об'єктів, адаптуючи розмір кожного на основі поточного профілю звернень. W-TinyLFU додає частотний фільтр типу Count-Min Sketch для ефективної апроксимації частоти звернень без значних накладних витрат пам'яті.

Проте, як доводять дослідження [18], у середовищах із різкою зміною патернів доступу (явище Concept Drift) навіть гібридні підходи до управління пам'яттю залишаються неефективними для мілітарних цілей. Головна проблема – їхня "семантична сліпота" (semantic blindness): алгоритми розглядають дані як знеособлені бітові блоки (payload) та покладаються винятково на ретроспективну статистику частоти або часу звернень, повністю ігноруючи тактичний контекст об'єкта.

Задля систематизації виявлених відмінностей у табл. 1 наведено порівняльний аналіз чотирьох класичних алгоритмів та пропонованого DVoI-підходу за п'ятьма вимірами. Алгоритмічна складність визначає придатність для вбудованих платформ з обмеженими ресурсами; механізм витіснення кешованого об'єкта – принцип ухвалення рішення щодо видалення об'єкта; стійкість до Cache Pollution – поведінку за масового сканування даних; семантична обізнаність – здатність враховувати тактичний пріоритет; SWaP-відповідність – загальну ресурсоемність рішення.

Табл. 1. Порівняльний аналіз класичних алгоритмів витіснення кешованого об'єкта за ключовими характеристиками / Comparative analysis of classical cached object eviction algorithms by key characteristics

Алгоритм	Складність O	Механізм витіснення кешованого об'єкта	Стійкість до Cache Pollution	SWaP-відповідність
LRU	O(1)	Давність останнього звернення	Низька	Дуже висока
LFU	O(log n)	Частота звернень (мінімальна)	Середня	Висока
ARC	O(1)	Гібрид давності + частоти (два списки)	Висока	Висока
W-TinyLFU	O(1) амортизована	Частота (Count-Min Sketch) + LRU-Window	Дуже висока	Висока
DVoI-Adaptive (пропоновано)	O(1) – O(log n)	Багатовимірний DVoI-вектор	Висока	Середня-висока

Згідно з даними табл. 1, можна зробити висновок, що жоден з наявних алгоритмів не надає API для зовнішнього введення тактичного контексту в процес формування черги витіснення кешованого об'єкта. Рішення про те, що видалити з кешу, ухвалюється винятково на основі внутрішньої алгоритмічної статистики – це є архітектурно неприйнятним для систем C4ISR.

Корпоративні розподілені системи In-Memory Data Grids: проблема консенсусу в нестабільних мережах. Архітектурні переваги IMDG-платформ (Redis, Hazelcast, Apache Ignite) добре задокументовані [5]: субмілісекундні затримки, горизонтальне масштабування, реплікація та шардування. Проте їх перенесення у мілітарне середовище виявляє нездоланні обмеження, пов'язані з CAP-теоремою [4, 10] та принципом PACELC [1].

Функціонування IMDG-платформ жорстко регламентовано суворими протоколами консенсусу – Raft [17] або Paxos [20]. Ці протоколи вимагають стабільно-

го кворуму для фіксації будь-якої операції запису. У DIL-мережах постійна втрата пакетів (Packet Loss) від впливу РЕБ призводить до зникнення сигналів перевірки стану (Heartbeats) між вузлами. Це ініціює повторювані вибори нового лідера кластера (Leader Election Storms) [10] – лавиноподібний процес, що генерує службовий трафік, який ще більше перевантажує і без того деградовані канали зв'язку, утворюючи позитивний зворотний зв'язок деградації.

У разі фрагментації мережі (англ. *Network Partitioning*) IMDG-системи, дотримуючись CP-моделі (Consistency + Partition Tolerance), примусово блокують операції запису на ізольованих вузлах для уникнення розсинхронізації (англ. *Split-Brain*). Для ізольованого тактичного командного пункту мережі C4ISR це означає повну відмову системи в найкритичніший момент бою (детальне порівняння характеристик MDG-систем у стабільних і DIL-мережах наведено у табл. 3).

Табл. 3. Порівняння поведінки IMDG-систем у стабільних і DIL-мережах /
Comparison of IMDG systems behavior in stable and DIL networks

Характеристика	Стабільна корпоративна мережа	Тактична DIL-мережа	Наслідок для мережі C4ISR
Рівень втрати пакетів (Packet Loss)	< 0,01 %	5-40 % (під впливом РЕБ)	Нескінченні Leader Election Storms
Стабільність Heartbeat-сигналів	Гарантована	Невизначена	Хибна ізоляція вузлів кластера
Поведінка при Split-Brain	Блокування запису (CP-модель)	Блокування запису (CP-модель)	Відмова оновлення карти оперативної обстановки
Ресурси для протоколів консенсусу	Незначні (< 1 % пропускну здатності магістральних ліній)	Значні (до 40 % каналу)	Конкуренція з бойовим трафіком
Операційна автономність вузла	Не потрібна	Критично необхідна	AP-модель є обов'язковою

Тактичні граничні обчислення та метрика Value of Information. Найінноваційніший напрям охоплює проблеми тактичних граничних обчислень (англ. *Tactical Edge Computing*), мілітарного Інтернету речей (IoMT/IoBT) [7, 15] та інформаційно-орієнтованих мереж (Information-Centric Networking, ICN-середовище) [2, 34]. Концепція "тактичних хмар" (англ. *Tactical Cloudlets*) [13] істотно підвищує живучість підрозділів у разі втрати зв'язку зі штабом, переносячи обчислювальні ресурси безпосередньо в бойові порядки.

Сучасні дослідження [33] пропонують замінити класичну метрику частоти звернень на показник "Віку інформації" (англ. *Age of Information*, AoI) – міру актуальності даних, що враховує тривалість їх генерування. Формально метрику AoI визначають як різницю між поточним моментом часу та тривалістю генерування останнього отриманого оновлення:

$$AoI(t) = t - u(t),$$

де: t – поточний час; $u(t)$ – тривалість генерування останнього доступного повідомлення. Чим більше значення $AoI(\cdot)$, тим застарілішою вважається інформація.

Новітні публікації починають розглядати метрику "Цінності інформації" VoI (англ. *Value of Information*) [11, 32] як основу для оптимізації ресурсів на тактичному краї. У загальному вигляді цінність інформації можна подати такою функцією:

$$VoI = f(R, T, C),$$

де: R характеризує релевантність інформації, T – її актуальність у часі, а C – контекстну значущість для виконання поточного завдання.

Однак, критичний аналіз наявних рішень виявляє гостру невирішену проблему: більшість наявних систем фокусуються на архітектурній топології розгортання кешів (фізичному розміщенні Edge-серверів), але всередині них продовжують функціонувати реактивні алго-

ритми витіснення кешованого об'єкта, нездатні розпізнавати семантику бойової задачі. Навіть AoI є одномірним показником: "свіжа" інформація не завжди є "найціннішою" – 10-хвилинна карта мініних полів незрівнянно перевищує за тактичним пріоритетом 1-секундне оновлення температури двигуна бронемашини. Це підтверджує наукову актуальність розроблення нових методів багатокритеріального оцінювання та адаптивних систем управління пам'яттю для мілітарних застосувань.

Запропонована парадигма адаптивного кешування даних на основі VoI. Синтез недоліків, виявлених у трьох класах розглянутих систем, а саме: класичних алгоритмів витіснення кешованого об'єкта, корпоративних IMDG-платформ та систем тактичних граничних обчислень, що були проаналізовані у попередньому підрозділі, формує чітке наукове завдання: розробити принципово нову парадигму управління кеш-пам'яттю для тактичних систем реального часу, яка є проактивною (здатна оцінювати поточну ситуацію та прогнозувати потреби) і семантично обізнаною (здатна розрізняти тактичний контекст об'єктів). Наявні підходи до управління кеш-пам'яттю є реактивними за природою – вони адаптуються до минулого стану системи. Системам критичного призначення натомість необхідний механізм, що оцінює поточний контекст та прогнозує майбутні потреби [25].

Пропонована парадигма проактивного семантично-адаптивного кешування базується на багатовимірній математичній моделі динамічної "Цінності інформації" DVoI (англ. *Dynamic Value of Information*), що формує пріоритет витіснення кешованого об'єкта для кожного об'єкта в кеші. На відміну від класичних підходів до витіснення кешованих даних, DVoI-скоринг перераховується не тільки за звернення до об'єкта, а й за зовнішніх тактичних тригерів: зміни режиму місії, деградації каналів зв'язку, отримання нових розвідданих.

Новизна отриманих результатів дослідження полягає у переході від пасивно-статистичного до активно-семантичного управління пам'яттю, де рішення про витіснення кешованого об'єкта ухвалює не "внутрішній лічильник звернень", а "зовнішній тактичний контекстний оркестратор". Фундаментально новизна полягає у розробленні багатовимірної математичної моделі DVoI-скорингу, яка вперше аналітично формалізує залежність пріоритету збереження об'єкта в пам'яті від стану деградації радіоелектронного середовища та просторово-часового місійного вектора. Це дає змогу звести задачу управління розподіленим кешем до задачі локальної багатокритеріальної оптимізації, вирішуючи проблему "семантичної сліпоти" класичних алгоритмів та математично забезпечуючи виконання вимог AP-моделі за CAP-теоремою за умов DIL-середовища.

Багатовимірна модель DVoI-скорингу. Динамічну цінність об'єкта o у кеші в момент часу t визначають як зважену суму трьох ортогональних вимірів, а саме:

$$DVoI(o, t) = \alpha(t) \cdot Sem(o) + \beta(t) \cdot EW_factor(t) \cdot Recoverability(o) + \gamma(t) \cdot Mission(o, t),$$

де: $Sem(o)$ – семантичний пріоритет об'єкта (статична характеристика типу даних, 0.1); $EW_factor(t)$ – нормований коефіцієнт деградації радіоелектронної обстановки (0=чистий ефір, 1=повна ізоляція); $Recoverability(o)$ – ймовірність повторного отримання об'єкта у разі витіснення кешованого об'єкта (0.1, обернено пропорційна до EW_factor); $Mission(o, t)$ – релевантність об'єкта поточній бойовій місії за Mission Context Vector (MCV) (0.1); $\alpha(t)$, $\beta(t)$, $\gamma(t)$ – адаптивні ваги, що нормуються за умовою $\alpha + \beta + \gamma = 1$ і динамічно коригуються оркестратором місії.

У разі витіснення кешованого об'єкта видаляється об'єкт з мінімальним DVoI, а не найрідше або найдовше невикористаний. Компонент $Sem(o)$ визначає базовий тактичний ранг типу даних незалежно від статистики звернень, приклад присвоєння пріоритету показано у табл. 4. Компонент $EW_factor(t)$ відображає реальну ймовірність повторного завантаження об'єкта у разі його видалення. За повної РЕБ-ізоляції ($EW_factor \rightarrow 1,0$) вартість видалення будь-якого об'єкта різко зростає – система автоматично переходить до "режиму виживання" (Survival Mode), мінімізуючи витіснення кешованого об'єкта.

Табл. 4. Семантичні пріоритети типів тактичних даних (Sem-скоринг) / Semantic priorities of tactical data types (Sem-scoring)

Тип даних	Sem(o)	Обґрунтування пріоритету
Бойовий наказ / вектор цілевказання	1,00	Безпосередній вплив на виживання особового складу
Координати дружніх підрозділів (BFT)	0,95	Критичне для уникнення дружнього вогню
Розвіддані (підтверджена ціль)	0,90	Безпосереднє тактичне значення
Карта мінних полів / зон ураження	0,85	Незворотні наслідки ігнорування
Маршрути евакуації / логістика	0,70	Важливо, але затримка терпима
Відеопотік БПЛА (реальний час)	0,50	Цінний, але частково відновлюваний
Фонові системна телеметрія	0,15	Діагностика, не впливає на хід бою
Оновлення топографічних карт (фонові)	0,10	Об'ємні, рідко змінюються критично

Компонент $Mission(o, t)$ реалізує місійно-орієнтовану оркестрацію (Mission-Aware Orchestration): у разі

зміни режиму місії (наприклад, марш $\rightarrow$ відбиття штурму) оркестратор транслює новий Mission Context Vector (MCV), що миттєво перераховує DVoI для всіх об'єктів у кеші та реструктурує чергу витіснення кешованого об'єкта (Eviction Queue) без блокування системи.

Архітектурна схема VoI-адаптивного кеш-менеджера. Для унаочнення внутрішньої організації запропонованого рішення та забезпечення відтворюваності його реалізації наведено компонентну архітектурну схему системи (рис. 1). Схема дає змогу однозначно ідентифікувати функціональні межі кожного модуля, зрозуміти напрями потоків даних і керівних сигналів, а також простежити, яким чином вхідні тактичні параметри трансформуються у пріоритетне рішення про витіснення кешованого об'єкта. Без графічного подання архітектури вербальний опис взаємодії шести взаємопов'язаних модулів залишався б неоднозначним і складним для перевірки.

DVoI-Adaptive Cache Manager (динамічний адаптивний менеджер кешу за цінністю інформації) – це спеціалізований архітектурний компонент або шаблон, що використовується у сучасних розподілених архітектурах, периферійних обчисленнях Інтернету речей та потоковому передаванні даних у реальному часі. Він динамічно оптимізує, які дані залишаються в кеші, на основі змінних вимог до корисності та актуальності даних, а не покладається винятково на традиційні метрики частоти доступу, такі як LRU (найменше використовуваний) або LFU (найменше використовуваний).

Запропонований динамічний адаптивний менеджер кешу за цінністю інформації реалізує трирівневу компонентну архітектуру розподіленого кешу, що забезпечує повний цикл збирання, оброблення та пріоритизації тактичних даних за умов радіоелектронної боротьби. Система спроектована за принципом розділення відповідальностей: кожен модуль виконує чітко визначену функцію, а міжмодульна взаємодія здійснюється через стандартизовані інтерфейси передавання даних і сигналів керування [26, 30].

Шар зовнішніх джерел охоплює три категорії постачальників даних:

1. РЕБ-сенсори та канали зв'язку – забезпечують безперервне вимірювання рівня електромагнітних завад та якості радіоканалу.
2. Місійний оркестратор тактичної мережі C4ISR – транслює оперативні накази, зміни бойового завдання та Mission Context Vector (MCV).
3. Джерела тактичних даних – постачають семантично різноманітні об'єкти (координати, звіти, розвіддані) для кешування даних.

Шар оброблення є ядром системи і містить шість спеціалізованих модулів:

1. EW Monitor – вимірює значення EW_factor у реальному часі та сигналізує про деградацію каналу.
2. Mission Context Engine – транслює та розбирає MCV-команди оркестратора.
3. Semantic Classifier – присвоює семантичний скоринг Sem кожному об'єкту відповідно до тактичної таксономії.
4. DVoI Calculator – центральний обчислювальний вузол, що агрегує три аналітичні сигнали за формулою $DVoI = \alpha \cdot Sem + \beta \cdot EW \cdot Rec + \gamma \cdot Mission$.
5. Adaptive Weight Controller – динамічно нормалізує коефіцієнти α , β , γ залежно від поточного оперативного режиму.
6. Priority Eviction Queue – підтримує мін-кupu об'єктів за значенням DVoI та ініціює витіснення кешованих записів із найнижчим пріоритетом.

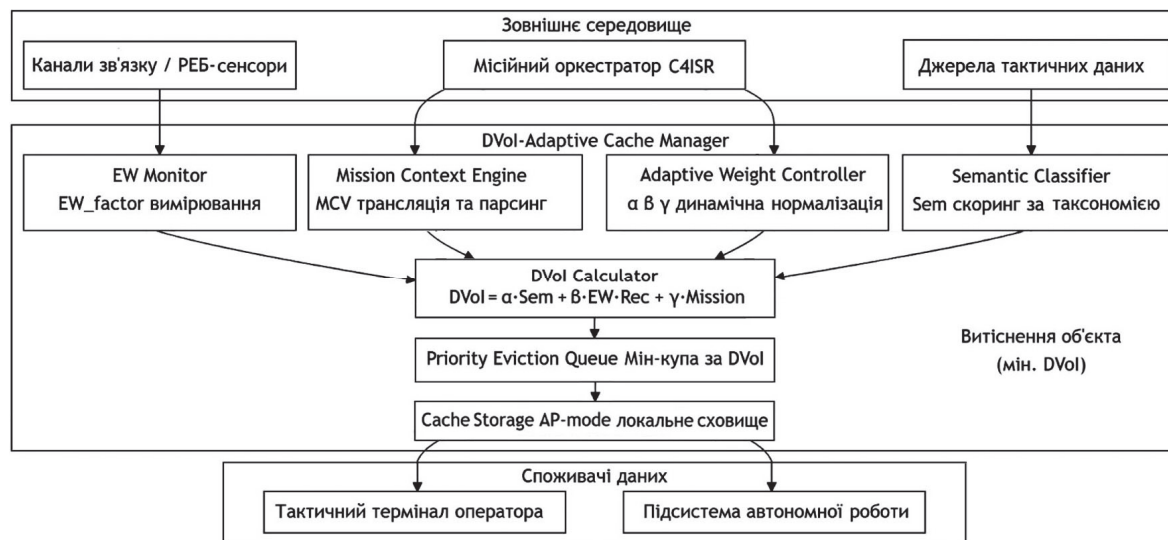


Рис. 1. Компонентна архітектура менеджера кешу DVoI-Adaptive Cache Manager / Component architecture of the DVoI-Adaptive Cache Manager

Шар споживачів містить тактичний термінал оператора та підсистему автономної роботи, які отримують актуальні дані безпосередньо з локального кеш-сховища (Cache Storage) у AP-режимі. На рис. 1 стрілки позначають напрями передавання даних і сигналів керування. DVoI Calculator виступає центральним вузлом агрегації, що об'єднує виходи модулів EW Monitor, Mission Context Engine та Semantic Classifier перед формуванням пріоритетної черги витіснення кешованого об'єкта. Adaptive Weight Controller коригує вагові коефіцієнти формули DVoI динамічно, отримуючи контекст безпосередньо від місійного оркестратора.

Адаптивні переходи між станами системи розподіленого кешу – це механізм динамічного перемикання режимів роботи вузлів кешування залежно від поточного навантаження, стану мережі, обсягу даних та апаратної доступності. Головна мета такого підходу – забезпечити високу доступність (High Availability), мінімальну затримку (Latency) та зберегти узгодженість даних (Consistency) в умовах мінливого середовища.

Оскільки поведінка системи істотно змінюється залежно від поточних умов функціонування, необхідно формально описати механізм адаптації та умови, за яких він спрацьовує. Діаграма станів системи (рис. 2) дає змогу верифікувати повноту та несуперечність логіки переходів: перевірити, що система не може опинитися у невизначеному стані, що кожен перехід має чітку умову спрацювання та зворотний шлях, і що набір вагових коефіцієнтів для кожного режиму обґрунтований тактичними пріоритетами. Формальне графове подання також спрощує подальше тестування – кожна дуга діаграми безпосередньо відповідає тест-кейсу переходу між станами системи.

Менеджер кешу DVoI-Adaptive Cache Manager функціонує у чотирьох оперативних режимах, між якими здійснюються автоматичні переходи на основі безперервного моніторингу ключових параметрів середовища. Машина станів системи забезпечує адаптацію вагових коефіцієнтів (α , β , γ) DVoI-формули без участі оператора, що критично важливо за умов деградованого зв'язку та швидкозмінної тактичної обстановки.

Кожному стану системи характерний унікальний профіль вагових коефіцієнтів, які наведено у табл. 5. Умови переходів між станами системи:

1. NormalOps $\rightarrow$ EWDegradation: значення EW_factor перевищує поріг 0,4, що свідчить про істотне погіршення якості радіоканалу внаслідок навмисних або ненавмисних завад.
2. NormalOps $\rightarrow$ MissionShift: місійний оркестратор тактичної мережі C4ISR передає оновлений Mission Context Vector, що сигналізує про зміну бойового завдання.
3. EWDegradation $\rightarrow$ NetworkIsolation: перевищення таймауту сигналів Heartbeat свідчить про повну втрату зв'язку з мережею та перехід в автономний AP-режим.
4. EWDegradation $\rightarrow$ NormalOps: значення EW_factor знижується нижче від порогу 0,2, що підтверджує відновлення нормального каналу.
5. NetworkIsolation $\rightarrow$ EWDegradation: часткове відновлення каналу дає змогу перейти у режим деградованої роботи з моніторингом.
6. NetworkIsolation $\rightarrow$ NormalOps: повне відновлення зв'язку повертає систему до штатного режиму функціонування.
7. MissionShift $\rightarrow$ NormalOps: стабілізація MCV завершує реструктуризацію пріоритетної черги та відновлює базові ваги.

Табл. 5. Таблиця пріоритетів вагових коефіцієнтів / Table of priority weighting factors

Стан	α (семантика)	β (РЕБ)	γ (місія)	Пріоритет
Нормальна робота	0,5	0,1	0,4	Баланс AoI та DVoI
РЕБ-деградація	0,4	0,4	0,2	Мінімізація витіснення кешованого об'єкта
Мережева ізоляція	0,3	0,6	0,1	Режим виживання AP
Зміна бойової місії	0,2	0,2	0,6	Реструктуризація EQ

Після нормалізації умов радіоелектронної обстановки та відновлення зв'язку система автоматично повертається до попереднього або базового режиму без будь-якого втручання оператора, що гарантує безперервність тактичної обізнаності за динамічних бойових умов.

На рис. 2 переходи між станами системи відбуваються автоматично за пороговими значеннями EW_factor, Heartbeat timeout та змінами MCV без участі оператора. Машина станів адаптивного менеджера кешу DVoI-Adaptive Cache Manager у тактичних системах класу C4ISR призначена для динамічного керування ге-

терогенними потоками даних (телеметрія, координати підрозділів, відеопотоки БПЛА, розвіднімки) в умовах обмеженої пропускної здатності та активного впливу засобів радіоелектронної боротьби (РЕБ). Система фун-

кціонує на базі чотирьох оперативних режимів (станів), переключення між якими залежить від рівня мережевого навантаження, інтенсивності завад РЕБ та критичності інформації.

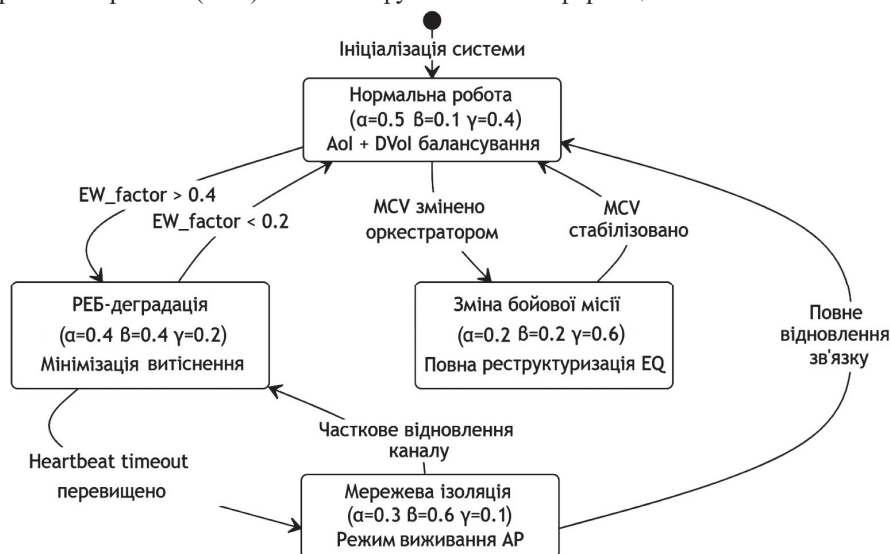


Рис. 2. Машина станів системи менеджера кешу DVoI-Adaptive Cache Manager із чотирма оперативними режимами / State machine of the DVoI-Adaptive Cache Manager system with four operational modes

Порівняння запропонованої парадигми з наявними підходами. Після формалізації DVoI-формули, специфікації таксономії семантичних рангів та опису архітектурної схеми і машини станів системи постає закономірне запитання: у чому полягає якісна відмінність запропонованого підходу від наявних рішень і чи не є DVoI-Adaptive парадигма управління розподіленням кешем тільки вдосконаленою версією відомих механізмів? Відповідь на це запитання потребує структурованого зіставлення на рівні архітектурних принципів, а не конкретних числових характеристик продуктивності. Саме задля цього побудовано табл. 5, що систематично порівнює реактивні підходи до витіснення кешованих даних (класичні алгоритми LRU/LFU та IMDG-систе-

ми) і запроповану DVoI-Adaptive парадигму за вісьмома практично значущими критеріями [12, 16].

Таблицю побудовано за принципом "артикуляції дефіциту": кожен рядок відображає конкретну функціональну прогалину наявних систем і показує, яким саме механізмом DVoI-парадигма цю прогалину усуває. Критерії відібрано не довільно, а виходячи зі системи метрик оцінювання, сформованої у табл. 1: кожен критерій відповідає щонайменше одній метриці мілітарної релевантності. Порівняння реактивних та проактивних підходів до кешування даних для тактичної мережі C4ISR [26] наведено у табл. 6. Детальний аналіз кожного критерію розкриває глибину принципових відмінностей.

Табл. 6. Порівняння реактивних та проактивних підходів до кешування даних для тактичної мережі C4ISR / Comparison of reactive and proactive data caching approaches for the C4ISR tactical network

Критерій	Реактивні системи (LRU/LFU/IMDG)	Пропонована DVoI-Adaptive парадигма
Підстава для рішення про витіснення кешованого об'єкта	Ретроспективна статистика звернень	Поточний тактичний контекст (DVoI-вектор)
Реакція на зміну місії	Відсутня (статична черга витіснення кешованого об'єкта)	Миттєва реструктуризація Eviction Queue
Поведінка за РЕБ-ізоляції	Блокування (CP-модель) або сліпе витіснення кешованого об'єкта	Перехід в Survival Mode AP + мінімальне витіснення кешованого об'єкта
Семантична обізнаність об'єктів	Відсутня	Вбудований Semantic Classifier (таксономія Sem)
Детермінізм затримок	$O(1)$ (LRU/LFU), субмілісекунди	$O(1) - O(\log n)$ залежно від розміру EQ
Відновлення після Split-Brain	Ручне / протокол консенсусу	Автономна AP-локальна операція без кворуму
API для зовнішнього контексту	Відсутній або статичні TTL	Mission Context Vector (MCV) REST/gRPC API
Стійкість до bursty traffic	Низька (Cache Pollution)	Висока (Sem-пріоритет блокує витіснення критичних об'єктів)

Підстава для рішення про витіснення кешованого об'єкта є фундаментальним критерієм, що визначає парадигму системи загалом. Реактивні системи спираються винятково на ретроспективні показники: LRU використовує час останнього звернення, LFU – накопичену частоту звернень, а IMDG-системи – статично налаштовані значення TTL. Принципова вада цього підходу полягає в тому, що минула поведінка не відображає майбутньої тактичної цінності об'єкта. DVoI-Adaptive вирішує цю проблему через перехід від ретроспективного до проспективного принципу: рішення про витіс-

нення кешованого об'єкта ухвалюється на основі поточного тривимірного вектора тактичного контексту, що відображає реальний стан середовища у момент прийняття рішення.

Реакція на зміну місії безпосередньо пов'язана з явищем Concept Drift. У реактивних систем черга витіснення кешованого об'єкта є статичною відносно семантики даних: після зміни бойового завдання система продовжує пріоритизувати об'єкти, що були актуальними для попередньої місії. DVoI-Adaptive вирішує цю проблему через механізм Mission Context Vector: отримання онов-

леного MCV від оркестратора тактичної мережі C4ISR є тригером для негайної повної реструктуризації Eviction Queue відповідно до нових місійних пріоритетів. Коефіцієнт γ , що відповідає за місійну компоненту, за переходу у стан MissionShift, зростає до 0,6 (найвище значення серед усіх станів системи), що дає змогу системі максимально швидко адаптувати склад кешу.

Поведінка за РЕБ-ізоляції є найбільш критичним критерієм з точки зору виживання системи в бойових умовах. Як формально доводить CAP-теорема [4, 10], IMDG-системи з CP-моделлю в разі настання мережевої ізоляції зобов'язані призупинити операції запису для збереження узгодженості. Класичні алгоритми не блокуються, але продовжують сліпе витіснення кешованого об'єкта без урахування деградації каналу. DVoI-Adaptive запроваджує третю альтернативу: у разі підвищення EW_factor понад пороговий рівень система автоматично переходить у стан NetworkIsolation, збільшує вагу β до 0,6, максимально підвищуючи пріоритет вже закешованих об'єктів з урахуванням коефіцієнта відновлюваності Res (ρ), та переходить у AP-режим повної локальної автономії.

Семантична обізнаність об'єктів визначає принципову здатність системи розрізняти тактичний пріоритет даних. Як встановлено, відсутність цієї властивості формує феномен "семантичної катастрофи витіснення кешованого об'єкта" – пряму загрозу оперативній ефективності. Semantic Classifier DVoI-Adaptive є першим серед розглянутих класів систем компонентом, що привносить формалізовану тактичну таксономію (див. табл. 4) безпосередньо у процес прийняття рішення про витіснення кешованого об'єкта.

Детермінізм затримок є єдиним критерієм, за яким DVoI-Adaptive має вимірну поступку реактивним системам. Операції з пріоритетною чергою витіснення кешованого об'єкта (мін-купою) виконуються за $O(\log n)$, тоді як LRU/LFU забезпечують гарантований $O(1)$ через хеш-таблицю з двозв'язним списком. Ця поступка є прийнятним архітектурним компромісом, оскільки в реальних тактичних сценаріях розмір кешу є обмеженим (типово $n < 10^4$ об'єктів), що забезпечує константну практичну затримку $\log(10^4) \approx 13$ операцій порівняння – значно менше 1 мс на сучасних вбудованих платформах.

Відновлення після Split-Brain у IMDG-системах є окремою складною проблемою: після відновлення зв'яз-

ку між ізованими сегментами необхідна фаза примирення (reconciliation), що може потребувати ручного втручання та несе ризик конфліктів записів. DVoI-Adaptive уникає цієї проблеми структурно: оскільки кожен вузол функціонує автономно за власним DVoI-вектором, після відновлення зв'язку синхронізація відбувається за принципом best-effort без блокуючої фази примирення.

API для зовнішнього контексту відображає ступінь інтеграційної відкритості системи. Реактивні системи є "закритими" відносно зовнішнього тактичного контексту: їхня поведінка визначається тільки внутрішніми параметрами (статистикою звернень або TTL). DVoI-Adaptive навмисно проєктується як відкрита система через стандартизований MCV REST/gRPC API, що дає змогу місійному оркестратору тактичної мережі C4ISR безпосередньо впливати на пріоритети кешу в реальному часі – це є реалізацією принципу "кешу, керованого контекстом".

Стійкість до bursty traffic завершує порівняння, демонструючи, як семантична обізнаність трансформується у практичну стійкість. У разі раптового надходження великого обсягу низькопріоритетних об'єктів (наприклад, відеофреймів БПЛА) реактивні системи зазнають Cache Pollution – витіснення кешованого об'єкта цінних критичних об'єктів потоком нових. DVoI-Adaptive запобігає цьому явищу структурно: об'єкти з низьким Sem-скорингом отримують низький DVoI, займаючи нижні позиції у мін-купі та витісняючись першими, тоді як критичні командні пакети ($Sem = 1,00$) залишаються захищеними незалежно від частоти звернень до них.

Отже, таблиця демонструє, що DVoI-Adaptive парадигма є не еволюційним вдосконаленням, а якісним парадигмальним зрушенням: переходом від реактивного, контекстно-сліпого управління пам'яттю до проактивного, семантично-усвідомленого підходу, спроектованого з урахуванням специфічних вимог тактичних DIL-середовищ.

Оцінювання класичних алгоритмів за мілітарними метриками. Систематичне застосування сформованої системи метрик (див. табл. 1) до трьох класів кеш-систем дає змогу отримати зведену картину їхньої придатності для тактичних середовищ DIL. Результати оцінювання кеш-системи за мілітарними метриками наведено у табл. 7.

Табл. 7. Зведені результати оцінювання кеш-систем за мілітарними метриками /
Summary evaluation results of cache systems by military metrics

Метрика	LRU/LFU/ARC	IMDG (Redis, Hazelcast)	Tactical Edge (DTN/ICN)	DVoI-Adaptive (пропоновано)
Контекстна адаптивність	Відсутня	Часткова (TTL, policy)	Часткова (AoI)	Повна (DVoI-вектор)
Відмовостійкість за ізоляції	Деградована	Блокування (CP)	DTN-буферизація	Survival Mode (AP)
Детермінізм затримок	$O(1)$ гарантований	< 1 мс (стабільна мережа)	Варіативна	$O(1) - O(\log n)$
SWaP-відповідність	Дуже висока	Низька (JVM, кластер)	Висока	Висока
Семантична обізнаність	Відсутня	Відсутня	Часткова (ICN-середовище-імена)	Повна (таксономія Sem)
Стійкість до Leader Election Storms	Не застосовно	Критична вразливість	Не застосовно	Не застосовно
Операційна автономність вузла	Повна	Залежить від кворуму	Повна (DTN)	Повна (AP-локальна)

Аналіз результатів оцінювання досліджуваних алгоритмів виявляє принципові закономірності. Класичні алгоритми (LRU/LFU/ARC) демонструють максимальну SWaP-ефективність та гарантований $O(1)$ -детермінізм, що є незаперечними перевагами для вбудованих

платформ. Проте їхня повна семантична сліпота та відсутність контекстної адаптивності роблять їх придатними тільки як компонент нижнього рівня гібридної архітектури, але не як самостійне рішення для тактичної мережі C4ISR [12].

Оцінювання класичних кеш-систем за наведеними мілітарними метриками (див. табл. 7) має якісний порівняльний характер і базується на формальному архітектурному аналізі їхньої стійкості до мережевої фрагментації (відповідно до CAP-теорема) та алгоритмічної складності операцій (з використанням О-нотації). Оскільки класичні алгоритми за своєю природою є семантично сліпими (Semantic Blindness), застосування до них специфічних аналітичних формул мілітарного оцінювання є математично некоректним, адже вони не здатні оперувати параметрами бойового середовища. Саме ця концептуальна обмеженість об'єктивно підтверджує необхідність розроблення нової моделі DVoI.

IMDG-системи виявляються найбільш вразливими саме за критично важливими для тактичної мережі C4ISR параметрами: відмовостійкість за ізоляції та операційна автономність вузла отримують негативну оцінку. Виявлена кореляція між рівнем втрати пакетів і частотою ініціювання Leader Election Storms підтверджує системний характер проблеми: за Packet Loss > 5 % типова IMDG-система витрачає від 15 до 40 % наявної пропускної здатності магістральних ліній на службовий трафік протоколів консенсусу [17], що є неприйнятним за умов РЕБ-впливу.

Теоретичний аналіз поведінки алгоритмів за нестабільності патернів доступу. Тактичним бойовим середовищем характерне явище різкої зміни патернів доступу до даних (Concept Drift): тривалі фази низькоінтенсивного фонових трафіку (телеметрія, картографія) можуть миттєво змінюватися "інформаційними сплесками" (Bursty Traffic), коли система отримує одночасно відеопотоки БПЛА, BFT-оновлення та критичні командні пакети. Аналіз алгоритмічних властивостей кожного класу систем за цих умов дає змогу передбачити їхню поведінку без проведення натурних випробувань.

Алгоритми LRU та LFU у режимі Bursty Traffic зазнають явища Cache Pollution [18, 27]: у разі раптового надходження великого потоку нових об'єктів (наприклад, відеофреймів БПЛА) алгоритм витісняє об'єкти з

найнижчим лічильником давності або частоти. Оскільки критичні командні пакети надходять рідко, вони набувають низьких значень обох лічильників і витісняються першими. Отже, чим нестабільнішим є трафік, тим вищою є ймовірність витіснення семантично критичних об'єктів – пряма залежність, що є структурним дефектом цих алгоритмів. W-TinyLFU частково долає цю проблему завдяки Count-Min Sketch [28], але тільки у стабільних патернах; за Concept Drift накопичена частотна статистика стає оманливою і вимагає повного скидання [6].

IMDG-системи за бурхливого трафіку зазнають подвійного навантаження: зростання кількості операцій запису збільшує частоту синхронізацій між вузлами, що поєднано з уже деградованим каналом DIL-середовища пришвидшує настання Leader Election Storms [17]. Отже, саме в момент найвищої оперативної активності (початок бою) ці системи генерують максимальне службове навантаження на мережу.

DVoI-Adaptive теоретично є стійким до Concept Drift, оскільки черга витіснення кешованого об'єкта ґрунтується не на accumulated статистиці, а на поточному DVoI-векторі. У разі зміни бойової місії (MCV-тригер) система миттєво реструктурує чергу витіснення кешованого об'єкта відповідно до нових пріоритетів, не очікуючи накопичення нової статистики звернень. Це є принциповою архітектурною перевагою за умов динамічних бойових середовищ.

Архітектурний аналіз відмовостійкості досліджуваних кеш-систем за умов фрагментації мережі. Формальний аналіз поведінки розглянутих систем за фрагментації мережі базується на CAP-теоремі [4, 10] та відомих властивостях протоколів консенсусу [17, 20]. Оскільки за умов DIL фрагментація мережі є не винятковим, а штатним сценарієм, питання вибору між CP- та AP-моделлю є ключовим архітектурним рішенням. Архітектурне порівняння поведінки систем за прогресивної деградації мережі наведено у табл. 8.

Табл. 8. Архітектурне порівняння поведінки систем за прогресивної деградації мережі / Architectural comparison of system behavior under progressive network degradation

Сценарій деградації	LRU/LFU (локальний кеш)	IMDG (CP-модель)	DVoI-Adaptive (AP-модель)
Стабільна мережа (Packet Loss < 1 %)	Нормальна робота, O(1) доступ	Нормальна робота, < 1 мс	Нормальна робота, O(log n) доступ
Помірна деградація (Packet Loss 1–5 %)	Без змін (локальний)	Зростання затримки реплікації	EW_factor росте → ваги β збільшуються
Вплив РЕБ (Packet Loss 5–20 %)	Без змін (локальний)	Leader Election Storms, різке зростання затримки	Перехід у стан EW-Degradation, мінімізація витіснень
Повна ізоляція (Packet Loss > 40 %)	Повна автономність, дані застарівають	Блокування запису (CP-відмова)	Перехід у Survival Mode, AP-автономія, пріоритет наявним даним
Відновлення зв'язку	Без дій	Повторна синхронізація, ризик конфліктів	Best-effort фонові синхронізація, без блокування

З табл. 8 випливає принципова відмінність: IMDG-системи у стані повної мережевої ізоляції відмовляють повністю (CP-відмова є детермінованою), тоді як DVoI-Adaptive продовжує локальне обслуговування операцій читання та запису, підтримуючи оперативну ефективність командного пункту навіть без зв'язку зі штабом. Це є критичною перевагою для тактичного рівня управління, де автономність вузла під час бою є вимогою першого порядку [7, 14].

Додатковою перевагою AP-підходу DVoI є передбачуваність поведінки: оператор системи завжди знає, що кеш доступний для читання та запису незалежно від

стану мережі. Для IMDG-систем момент переходу у CP-відмову є недетермінованим і залежить від конфігурації timeout та поточного стану кворуму – що унеможливає надійне планування операцій.

Розгляньмо конкретний сценарій відмови. Командний пункт батальйону функціонує з кешем на базі LRU-алгоритму. Упродовж 45 хв оператори активно переглядають відеопотік з БПЛА (Sem = 0,50, висока частота звернень). LRU-алгоритм акумулює великий "лічильник давності" для відеофреймів. У момент отримання критичного наказу на атаку (Sem = 1,00) та підтверджених координат цілей (Sem = 0,90) кеш вияв-

ляється заповненим відеоданими. LRU витісняє саме ці нові критичні об'єкти – бо вони "найновіші" та ще не мають значного лічильника давності. Система фіксує низьке навантаження (кеш повний), хоча стратегічна інформаційна ефективність впала до нуля. Цей феномен – "семантична катастрофа при переповненні" – є прямим наслідком семантичної сліпоти та є архітектурно неприйнятним у системах, де помилка управління пам'яттю може мати незворотні оперативні наслідки.

Парадокс консенсусу та CAP-теорема за умов РЕБ. Особливої уваги заслуговує поведінка IMDG-систем з консенсусними протоколами за умов РЕБ-впливу. CAP-теорема [4, 10] встановлює фундаментальне обмеження: розподілена система може одночасно гарантувати тільки дві з трьох властивостей – узгодженість (Consistency), доступність (Availability) та стійкість до розподілу (Partition Tolerance). У DIL-мережах Partition Tolerance є аксіоматичною необхідністю – фрагментація мережі неминуча. Отже, проєктувальники мають обирати між CP і AP моделями.

IMDG-системи обирають CP-модель, жертвуючи доступністю заради узгодженості. Для корпоративних систем (банківські транзакції, медичні записи) це є раціональним вибором. Проте для ізольованого тактичного командного пункту мережі C4ISR це означає системну відмову саме тоді, коли функціональність є найбільш критичною. Принцип PACELC [1] поглиблює цю проблему: навіть за відсутності фрагментації IMDG-система змушена обирати між затримкою і узгодженістю, що за DIL-умов неминуче призводить до зростання латентності.

Пропонована DVoI-парадигма вирішує цю дилему через явний вибір AP-моделі як архітектурного принципу. Локальна консистентність забезпечується детерміністичним DVoI-скорингом без необхідності мережевого консенсусу. Синхронізація між вузлами виконується у фоновому режимі за принципом "найкращих зусиль" (best-effort) тільки за наявності каналу, не блокуючи локальні операції.

Отже, отримані результати доводять високу ефективність запропонованого методу DVoI-скорингу. На відміну від класичних рішень, він гарантує збереження критично важливих тактичних даних за умов повної ізоляції вузла та унеможливує "семантичну сліпоту" кешу, зберігаючи детермінований час відгуку на рівні $O(1)-O(\log n)$. Це повністю вирішує проблему деградації пам'яті за умов інтенсивного впливу РЕБ і підтверджує архітектурну придатність парадигми для впровадження у сучасні тактичні мережі C4ISR.

Обговорення результатів дослідження. Результати аналізу досліджуваних кеш-архітектур підтверджують центральну тезу роботи: класичні алгоритми кешування даних є архітектурно непридатними для самостійного застосування в C4ISR-системах через технічні дефекти реалізації та фундаментальну парадигмальну несумісність з вимогами мілітарних DIL-середовищ. Порівняльний аналіз отриманих результатів із сучасними підходами до граничного кешування виявляє кілька принципів переваг розробленої DVoI-адаптивної парадигми.

По-перше, подолання "семантичної сліпоти". У роботах [19, 20], в яких розглянуто ICN-середовище та мобільні Edge-обчислення, а також у дослідженнях кооперативного кешування для БПЛА на основі машинного навчання [15, 32], базовою метрикою витіснення

кешованого об'єкта залишається популярність контенту (частота запитів) або накопичена статистика звернень. На відміну від них, запропонована парадигма DVoI оперує семантичною значущістю об'єкта та динамічним місійним контекстом. Це дає змогу системі зберегти критичні бойові накази навіть за умови їхньої низької статистичної частоти, повністю усуваючи ризик витіснення життєво важливої інформації масовим, але низькопріоритетним трафіком (наприклад, відеопотоком з БПЛА).

По-друге, стійкість до РЕБ-деградації та відмова від жорстких таймерів. Наявні в сучасній літературі методи відкладеного витіснення кешованого об'єкта [14] та оптимізації ієрархій TTL-кешів [7] мінімізують затримки на основі таймерів та очікуваного часу завантаження об'єктів. Однак за умов тактичного середовища час відновлення зв'язку є непередбачуваним. Наш підхід, завдяки інтеграції нормованого коефіцієнта радіоелектронної обстановки та ймовірності повторного отримання об'єкта, динамічно адаптує ваги витіснення кешованого об'єкта. Це гарантує збереження важковідновлюваних розвідувальних даних без жорсткої прив'язки до статичних TTL-таймерів, які втрачають ефективність за непередбачуваного глушіння каналів.

По-третє, гарантована автономність (AP-доступність) за мережевої ізоляції. Архітектурна гнучкість нашої системи істотно перевершує наявні аналоги в разі повної втрати зв'язку. На відміну від апаратного закріплення критичних задач у базових станціях 5G [17] або методів проактивного кешування [31], які вимагають зв'язку для маршрутизації та координації вузлів, наша чотирирежимна машина станів забезпечує детермінований перехід в AP-режим (Availability + Partition tolerance). Це дає змогу ізольованому командному пункту миттєво припинити спроби відновлення консенсусу (характерні для CP-моделей) і продовжувати автономну роботу, що є критичним фактором для виживання вузла.

Отже, порівняння отриманих результатів із сучасною літературою повністю підтверджує доцільність та високу практичну значущість проведеного дослідження. Упровадження багатовимірного показника DVoI спільно з чотирирежимною машиною станів дало можливість вирішити комплексну проблему, яка досі залишалася поза увагою в аналізованих наукових працях – забезпечення живучості та семантичної цілісності даних на граничних вузлах за умов жорсткої мережевої ізоляції та РЕБ-деградації. Жодна з наявних комерційних чи академічних моделей не забезпечує подібної багатовимірної адаптивності без залучення зовнішньої координації.

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

Наукова новизна отриманих результатів дослідження – удосконалено метод адаптивного кешування даних для мілітарних систем реального часу класу C4ISR, який, на відміну від наявних методів, здійснює інтеграцію багатовимірного показника динамічної цінності інформації (DVoI) та враховує детерміновану чотирирежимну машину станів, що базуються винятково на ретроспективній статистиці звернень або статичних таймерах, забезпечує проактивну реструктуризацію черги витіснення кешованого об'єкта на основі семантичного його пріоритету й оперативного контексту місії та га-

рантує автономну AP-доступність даних за мережевої ізоляції вузла.

Практична значущість результатів дослідження – можна застосувати для проектування адаптивних кеш-менеджерів у тактичних вузлах мережі C4ISR, що функціонують за умов DIL-середовищ (Denied, Intermittent, Low-bandwidth): зокрема, для програмного забезпечення мобільних командних пунктів батальйонного та бригадного рівнів, бортових інформаційних систем БПЛА, наземних розвідувальних платформ та польових терміналів збирання розвідувальних даних, де гарантована автономна доступність критичної бойової інформації за умов повної мережевої ізоляції або активного РЕБ-впливу є вимогою першого порядку.

Висновки / Conclusions

Виконано комплексний порівняльний аналіз методів і технологій кешування даних за спеціалізованими критеріями мілітарних систем, що дало можливість обґрунтувати концепцію застосування VoI-орієнтованої адаптивної системи управління кеш-пам'яттю для тактичної мережі C4ISR. За результатами проведеного дослідження можна зробити такі основні висновки.

1. Доведено архітектурну непридатність класичних алгоритмів витіснення кешованого об'єкта (LRU, LFU, ARC, W-TinyLFU) для самостійного застосування в тактичних C4ISR-системах. Це було встановлено на підставі аналізу механізмів оброблення даних за умов переповнення пам'яті, що дало можливість ідентифікувати явище "семантичної сліпоты" (принципову нездатність розрізняти тактичний пріоритет об'єктів) та обґрунтувати необхідність обов'язкового переходу до семантично-орієнтованих метрик для запобігання втраті критичних бойових даних на користь фонові інформації.
 2. Встановлено системну несумісність IMDG-архітектур (CP-модель) з вимогами DIL-середовищ на підставі теоретичного аналізу поведінки протоколів консенсусу (Raft, Paxos) та застосування принципів CAP-теорему до умов високого рівня втрати пакетів (5–40 %), характерного для РЕБ-впливу. Це довело, що спроби збереження мережевого консенсусу неминуче призводять до катастрофічної деградації системи (Leader Election Storms, блокування запису), та зумовило безальтернативність архітектурного переходу до AP-моделей для мобільних вузлів.
 3. Математично формалізовано та побудовано багатовимірну проактивну скорингову модель динамічної цінності інформації (DVoI). Це здійснено шляхом інтеграції трьох ортогональних вимірів (семантичного пріоритету, радіоелектронної обстановки та місійного контексту) в єдину аналітичну залежність. Як наслідок це дало змогу вирішити проблему "семантичної сліпоты" та забезпечило здатність системи здійснювати контекстне обчислення пріоритетів збереження об'єктів у реальному часі незалежно від накопиченої статистики звернень до них.
 4. Спроектовано концептуальну компонентну архітектуру адаптивного кеш-менеджера (DVoI-Adaptive Cache Manager) та розроблено детерміновану чотирирежимну машину його станів. Архітектура базується на механізмах автоматичного відстеження метрик DIL-середовища та локального управління пам'яттю. Це забезпечує здатність системи здійснювати детерміністичні переходи між оперативними режимами без зовнішньої координації, гарантуючи безперебійний перехід вузла в автономний режим виживання та підтримуючи AP-доступність критичних даних за повної мережевої ізоляції.
- Практичним результатом роботи є сформована теоретична та архітектурна база для програмної реалізації

менеджера кешу DVoI-Adaptive Cache Manager як компонента тактичної C4ISR-системи. Подальші етапи дослідження мають бути спрямовані на прототипування та емпіричну верифікацію запропонованої моделі за умов реалістичного DIL-тестового середовища.

Декларація про використання штучного інтелекту. Під час підготовки цієї роботи автори використовували сервіси ChatGPT та Grammarly для: перевірки граматики та орфографії, перефразування та переформулювання складних речень з текстовими зворотами. Після використання цих сервісів автори проаналізували та відредагували контент майбутньої статті, тобто несуть повну відповідальність за зміст публікації.

References

1. Abadi, D. (2012). Consistency tradeoffs in modern distributed database system design: CAP is only part of the story. *Computer*, 45(2), 37–42. <https://doi.org/10.1109/MC.2012.33>
2. Baccelli, E., Mehli, C., Hahm, O., Schmidt, T. C., & Wählisch, M. (2014). Information centric networking in the IoT: Experiments with NDN in the wild. *Proceedings of the 1st ACM Conference on Information-Centric Networking*, pp. 77–86. <https://doi.org/10.1145/2660129.2660144>
3. Bekas, B. O., Prots, A. M., & Hrytsiuk, Y. I. (2026). Software for isolated deployment of a web application in a containerized environment. *Scientific Bulletin of UNFU*, 36(3), 86–97. <https://doi.org/10.36930/40360309>
4. Brewer, E. A. (2012). CAP twelve years later: How the "rules" have changed. *Computer*, 45(2), 23–29. <https://doi.org/10.1109/MC.2012.37>
5. Dragojević, A., Narayanan, D., Nightingale, E. B., Renzelmann, M., Shamis, A., Badam, A., & Castro, M. (2015). No compromises: Distributed transactions with consistency, availability, and performance. *Proceedings of the 25th Symposium on Operating Systems Principles*, pp. 54–70. <https://doi.org/10.1145/2815400.2815425>
6. Einziger, G., Friedman, R., & Manes, B. (2017). TinyLFU: A highly efficient cache admission policy. *ACM Transactions on Storage (TOS)*, 13(4), 1–31. <https://doi.org/10.1145/3149371>
7. Elsayed, K. S., Geyer, F., & Rizk, A. (2026). Optimizing TTL cache hierarchies under random delays: Direct methods and learning on graph transformations. *Computer Networks*, 280, article ID 112180. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2026.112180>
8. Fall, K. (2003). A delay-tolerant network architecture for challenged internets. *Proceedings of the 2003 Conference on Applications, Technologies, Architectures, and Protocols for Computer Communications (SIGCOMM)*, pp. 27–34. <https://doi.org/10.1145/863955.863960>
9. Fenii, N. S., & Hrytsiuk, Y. I. (2020). Automation of the process of classification of text news from internet sites by neural network methods. *Scientific Bulletin of UNFU*, 30(4), 123–133. <https://doi.org/10.36930/40300421>
10. Gilbert, S., & Lynch, N. (2002). Brewer's conjecture and the feasibility of consistent, available, partition-tolerant web services. *ACM SIGACT News*, 33(2), 51–59. <https://doi.org/10.1145/564585.564601>
11. Golen, E. F., Farroha, B. S., Farroha, D. L., & Yen, S. M. (2010). Value of information (VoI) for decision support in tactical networks. *2010 IEEE Military Communications Conference (MILCOM)*, pp. 1–6. <https://doi.org/10.2165/11537370-000000000-00000>
12. Kott, A., Swami, A., & West, B. J. (2016). The internet of battle things. *Computer*, 49(12), 70–75. <https://doi.org/10.1109/MC.2016.355>
13. Lewis, G. A., Echeverría, S., Simanta, S., & Bradshaw, B. (2014). Tactical cloudlets: Moving cloud computing to the edge. *2014 IEEE Military Communications Conference (MILCOM)*, pp. 1440–1446. <https://doi.org/10.1109/MILCOM.2014.238>
14. Li, P., Zhang, Y., Zhang, H., Wang, W., Xu, K., & Zhang, Z. (2023). A delayed eviction caching replacement strategy with uni-

- fied standard for edge servers. *Computer Networks*, 230, article ID 109794. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2023.109794>
15. Lyu, Z., Zhang, Y., Yuan, X., Wei, Z., Fu, Y., Feng, L., & Zhou, H. (2024). Innovative edge caching: A multi-agent deep reinforcement learning approach for cooperative replacement strategies. *Computer Networks*, 253, article ID 110694. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2024.110694>
 16. Mach, P., & Becvar, Z. (2017). Mobile edge computing: A survey on architecture and computation offloading. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 19(3), pp. 1628–1656. <https://doi.org/10.1109/COMST.2017.2682318>
 17. Maroun, E. J., Grotuzas, A., & Schoeberl, M. (2026). Shared caches for mixed-criticality 5G radio base station. *Journal of Systems Architecture*, 176, article ID 103808. <https://doi.org/10.1016/j.sysarc.2026.103808>
 18. Podlipnig, S., & Böszörményi, L. (2003). A survey of web cache replacement strategies. *ACM Computing Surveys (CSUR)*, 35(4), 374–398. <https://doi.org/10.1145/954339.954341>
 19. Pruthvi, C. N., Vimala, H. S., & Shreyas, J. (2023). A systematic survey on content caching in ICN- and ICN-IoT: Challenges, approaches and strategies. *Computer Networks*, 233, article ID 109896. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2023.109896>
 20. Reiss-Mirzaei, M., Ghobaei-Arani, M., & Esmaili, L. (2023). A review on the edge caching mechanisms in the mobile edge computing: A social-aware perspective. *Internet of Things*, 22, article ID 100690. <https://doi.org/10.1016/j.iot.2023.100690>
 21. Russell, S., Abdelzahr, T., & Kaplan, L. (2018). Internet of battlefield things (IoBT): Concept and architectural considerations. *2018 International Conference on Military Communications and Information Systems (ICMCIS)*, 1–7. <https://doi.org/10.1109/ICMCIS.2018.8398701>
 22. Salo, M. F., & Hrytsiuk, Y. I. (2026). Web application for forecasting military needs based on analysis and monitoring of their humanitarian support. *Scientific Bulletin of UNFU*, 36(3), 45–61. <https://doi.org/10.36930/40360305>
 23. Satyanarayanan, M. (2017). The emergence of edge computing. *Computer*, 50(1), 30–39. <https://doi.org/10.1109/MC.2017.9>
 24. Shi, W., Cao, J., Zhang, Q., Li, Y., & Xu, L. (2016). Edge computing: Vision and challenges. *IEEE Internet of Things Journal*, 3(5), 637–646. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2016.2579198>
 25. Somuyiwa, S. O., György, A., & Gündüz, D. (2018). A reinforcement-learning approach to proactive caching in wireless networks. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 36(6), 1331–1344. <https://doi.org/10.1109/JSAC.2018.2844985>
 26. Suri, N., Tortonesi, M., & Michaelis, J. (2015). Exploring value-of-information-based approaches to support effective communications in tactical networks. *IEEE Communications Magazine*, 53(10), 40–47. <https://doi.org/10.1109/MCOM.2015.7295461>
 27. Suri, N., Tortonesi, M., Michaelis, J., Budulas, P., Benincasa, G., Russell, S., & Winkler, R. (2016). Analyzing the applicability of internet of things to the battlefield environment. *2016 International Conference on Military Communications and Information Systems (ICMCIS)*, 1–8. <https://doi.org/10.1109/ICMCIS.2016.7496574>
 28. Tornell, S. M., Patra, S., Calafate, C. T., Cano, J. C., & Manzoni, P. (2015). DTN protocols for vehicular networks: An application oriented overview. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 17(2), 868–887. <https://doi.org/10.1109/COMST.2014.2375340>
 29. Torskyi, O. I., & Hrytsiuk, Y. I. (2025). Application of machine learning to enhance the efficiency of automated software testing. *Scientific Bulletin of UNFU*, 35(4), 142–49. <https://doi.org/10.36930/40350416>
 30. Wang, S., Zhang, X., Zhang, Y., Wang, L., Yang, J., & Wang, W. (2017). A survey on mobile edge networks: Convergence of computing, caching and communications. *IEEE Access*, 5, 6757–6779. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2685434>
 31. Wang, Y., & Friderikos, V. (2022). Energy-efficient proactive caching with multipath routing. *Computer Networks*, 216, article ID 109272. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2022.109272>
 32. Wang, Z., Chen, L., Chen, P., Zheng, Y., & Zhang, W. (2026). Joint caching-trajectory optimization for dynamic UAV-MEC networks: Context-aware game combined MADDPG. *Computer Networks*, 282, article ID 112267. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2026.112267>
 33. Yates, R. D., & Kaul, S. K. (2012). Real-time status updating: Multiple sources. *2012 IEEE International Symposium on Information Theory Proceedings*, pp. 2666–2670. <https://doi.org/10.1109/ISIT.2012.6284003>
 34. Zhang, L., Afanasyev, A., Burke, J., Jacobson, V., Crowley, P., Papadopoulos, C., & Zhang, B. (2014). Named data networking. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 44(3), 66–73. <https://doi.org/10.1145/2656877.2656887>

N. R. Balko¹, Yu. I. Hrytsiuk^{1,2}

¹ Ukrainian National Forestry University, Lviv, Ukraine

² Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine,

ANALYSIS OF ADAPTIVE DATA CACHING STRATEGIES IN TACTICAL INFORMATION NETWORKS

Ensuring the availability of mission-critical data in tactical C4ISR networks under the influence of electronic warfare (EW) remains an unresolved architectural problem of distributed real-time systems. The conducted study applies a systematic multi-criteria analytical framework, based on the CAP theorem formalism, PACELC tradeoff analysis, and a specially developed system of survivability metrics for military systems – for the comparative evaluation of three classes of data caching mechanisms: classical cached object eviction algorithms (LRU, LFU, ARC, W-TinyLFU), enterprise In-Memory Data Grid (IMDG) platforms, and tactical edge computing frameworks for DIL (Disconnected, Interrupted, Low-Bandwidth) environments. The analysis of cached object eviction algorithms proves that classical algorithms demonstrate systemic "semantic blindness" – the inability to distinguish the tactical priority of data causes the eviction of combat orders in favor of background telemetry; this phenomenon is formalized in the paper as a "semantic cached object eviction catastrophe". In addition, IMDG systems relying on Raft and Paxos consensus protocols become functionally paralyzed during network fragmentation: at a packet loss rate of over 5 % (typical under EW conditions), such systems spend up to 40 % of the backbone bandwidth on leader election service traffic, blocking all write operations on isolated nodes due to the CP model. As a consequence, both memory management approaches fail to satisfy the AP model (Availability + Partition Tolerance) requirement, which is axiomatic for tactical command posts. To overcome the identified limitations, an adaptive data caching paradigm based on the Dynamic Value of Information (DVoI) is proposed: a three-dimensional scoring model integrating the payload semantic rank (Sem), the EW degradation coefficient (EW_factor), and the mission context (Mission), governed by a four-state machine of the system without external network consensus. The practical significance of the work lies in the development of a formalized evaluation system of cache systems for military applications and the DVoI architectural blueprint suitable for integration into prospective deployments in tactical C4ISR networks.

Keywords: semantic blindness of cached object eviction; dynamic value of information; distributed node survivability; consensus in unstable networks; tactical C4ISR network; real-time edge computing.