

**Писаренко Ю.В.**

<https://orcid.org/0000-0001-8357-8614>

Інститут кібернетики імені В. М. Глушкова Національної академії наук України

**Кармазін К.В.**

<https://orcid.org/0009-0003-8852-8079>

Інститут кібернетики імені В. М. Глушкова Національної академії наук України

## ЦИФРОВИЙ ДВІЙНИК МЕРЕЖІ ТА ФЕДЕРАТИВНЕ МУЛЬТИАГЕНТНЕ НАВЧАННЯ ДЛЯ РЕЗИЛЬЄНТНОГО КЕРУВАННЯ ПОТОКОВИМ ВІДЕО І ТЕЛЕМЕТРІЄЮ В СИТУАЦІЙНИХ ЦЕНТРАХ

У статті розглянуто проблему використання штучного інтелекту (ШІ) для обробки та аналізу великих обсягів даних у реальному часі з інтеграцією мультиагентних систем у середовищах підвищеної динаміки та невизначеності. Актуальність дослідження зумовлена стрімким зростанням потоків даних, що генеруються безпілотними літальними апаратами, сенсорними мережами, робототехнічними платформами та мультимедійними сервісами. У таких умовах традиційні централізовані підходи до обробки інформації виявляються недостатньо ефективними через обмеження пропускної здатності каналів зв'язку, затримки передачі та нестабільність мережевої інфраструктури.

Запропоновано концепцію інтелектуальної резильєнтної архітектури, яка поєднує методи машинного навчання, навчання з підкріпленням, прогнозування часових рядів і генеративні моделі з мультиагентною координацією. Розроблено математичну модель оптимізації якості функціонування системи на основі функціоналу винагороди, що враховує затримку передачі, втрати пакетів та стабільність показників якості сервісу. У роботі формалізовано підхід до побудови мультиагентної системи, де окремі агенти (дрони, edge-вузли, ситуаційні центри) взаємодіють через узгоджені стратегії керування потоками даних.

Окрему увагу приділено створенню цифрового двійника середовища для прогнозування майбутніх станів системи та формування адаптивної політики керування. Показано, що інтеграція генеративних моделей дозволяє компенсувати втрати даних і підвищувати суб'єктивну якість сприйняття інформації без збільшення навантаження на мережу. Запропонований підхід може бути застосований у системах моніторингу повітряного простору, техноекологічних подій, безпекових комплексах та мультимедійних потокових сервісах.

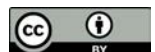
Отримані результати формують науково-методичну основу побудови резильєнтних інтелектуальних інформаційних систем нового покоління, здатних до самоадаптації, кооперації агентів та стійкого функціонування в умовах динамічного середовища.

**Ключові слова:** штучний інтелект, обробка даних у реальному часі, мультиагентні системи, резильєнтність, машинне навчання, навчання з підкріпленням, генеративні моделі, цифровий двійник.

**Постановка проблеми.** Ситуаційні центри (СЦ), що забезпечують моніторинг, аналіз і підтримку прийняття рішень у реальному часі, дедалі більше залежать від стабільності потоків даних, насамперед відео та телеметрії з мобільних і стаціонарних сенсорів. У сценаріях техноекологічних інцидентів, подвійного призначення критичною стає не «максимальна» якість відео, а гарантована безперервність, прогнозованість

затримок і узгоджена робота багатьох джерел у межах одного інформаційного контуру.

Однак реальне мережеве середовище СЦ є нестабільним: пропускна здатність коливається, зростає ймовірність втрат пакетів, змінюється топологія (мобільні вузли, тимчасові ретранслятори), а транспортні механізми можуть переходити на нові протоколи, що змінює поведінку затримок та мультиплексування.



У таких умовах класичні схеми адаптивної передачі відео (ABR) часто оптимізують «середню» якість користувацького досвіду (Quality of Experience, QoE), але недостатньо враховують стійкість цього досвіду в часі – тобто здатність системи підтримувати прийнятну якість під зовнішніми збуреннями без різких провалів та частих перемикань. Стандартизовані підходи об'єктивного оцінювання QoE описують типові деградації адаптивного потокового відео (зупинки відтворення через буферизацію, перемикання рівнів якості тощо), але самі по собі не є механізмом керування: потрібне поєднання моделей оцінки якості з механізмами прогнозування та оптимізації політики вибору параметрів потоку.

Додатково проблема ускладнюється багато-потоківістю: у СЦ одночасно можуть працювати десятки потоків (різні БПЛА, наземні роботи, стаціонарні камери), і рішення «покращити QoE одного потоку» може погіршити узгодженість системи загалом. Для таких сценаріїв актуальні постановки колективної оптимізації QoE та справедливого розподілу ресурсів між агентами, що вже розглядаються у підходах з багатоагентною координацією до потокового відео.

Нарешті, практична інженерія вимагає масштабування: регіональні/мобільні СЦ мають різні умови мережі та різну «статистику збурень», а дані відео/телеметрії можуть бути чутливими. Це піднімає дилему: як навчати та оновлювати інтелектуальні політики (прогнозування, RL/MA-RL, реконструкція) без централізації сирих даних? Проблема формулюється як необхідність створення резильєнтної архітектури керування потоками даних, що поєднує: цифровий двійник мережі для замкненого керування та безпечного тестування; федеративне навчання для перенесення моделей між СЦ; мультиагентну оптимізацію QoE/резильєнтності в багатопоточковому середовищі.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Стандартизованою основою сучасного HTTP-адаптивного стрімінгу є MPEG-DASH (ISO/IEC 23009-1) [1], який визначає формат опису презентації (MPD) та сегментів і підтримує модель, де клієнт керує вибором сегментів/якості через HTTP-запити. Це безпосередньо корелює з постановкою задачі ABR як задачі керування політикою вибору якості в часі.

Оцінювання якості в адаптивному потоковому відео може бути стандартизовано через ITU-T P.1203 [2]: рекомендація описує параметричні модулі оцінки аудіо- та відеоякості з урахуванням

зупинок відтворення через буферизацію та початкових затримок. Для ситуаційних центрів це цінно як база відтворюваних метрик, на які можна спиратися під час формування функцій винагороди в алгоритмах навчання з підкріпленням або критеріїв оптимізації в багатоагентному керуванні.

З погляду транспортного шару перехід до протоколів QUIC [3] і HTTP/3 [4] є важливим через можливість мультиплексування потоків, скорочення затримки встановлення з'єднання та інтегрований криптографічний захист (TLS 1.3 для QUIC). Для місійних систем ситуаційного центру це означає зміну профілю затримок і втрат, а отже – потребу адаптації моделей прогнозування та механізмів контролю.

У домені адаптивного вибору бітрейту існують сильні «класичні» алгоритми. Метод BOLA [5] демонструє формалізацію вибору бітрейту як задачі максимізації корисності з використанням оптимізації Ляпунова та керування буфером, що робить його важливою базовою моделлю для порівняння з інтелектуальними підходами.

Робота Pensieve [6] стала канонічним прикладом навчання політик адаптивної передачі відео на основі навчання з підкріпленням, показавши, що стратегія може бути сформована на основі досвіду без жорстко закодованих евристик. Водночас, як і для будь-яких підходів навчання з підкріпленням у мережесередовищах, залишається питання перенесення моделей між різними умовами та чутливості до репрезентативності навчальних сценаріїв, що особливо актуально для різних регіональних ситуаційних центрів.

Для багатопоточкового режиму та забезпечення справедливого розподілу ресурсів між потоками перспективними є підходи багатоагентної оптимізації QoE [7], де оптимізаційна мета задається як нелінійна функція колективних винагород (якість досвіду і справедливість). Такі постановки формують методологічну основу для ситуаційних центрів, у яких потоки мають різний рівень критичності та різні угоди щодо рівня сервісу (SLA) і пріоритетів.

Окремий сучасний напрям – генеративні методи компенсації втрат і артефактів у адаптивному потоковому відео через HTTP. Концепція застосування генеративного штучного інтелекту для адаптивного потокового відео [8] ставить питання: чи можливо підвищити суб'єктивну якість за рахунок локальної реконструкції на рівні периферійних обчислень (edge) замість збільшення бітрейту або агресивного зниження якості під час мережесередовищних провалів.

Для системного переходу до масштабованих рішень ключовою є концепція мережі цифрового двійника (Digital Twin Network) [9]. У рекомендації ITU-T Y.3090 така мережа визначається як віртуальне представлення фізичної інфраструктури, призначене для аналізу, діагностики, емуляції та контролю з акцентом на замкнений цикл «дані – модель – інтерфейс – взаємодія віртуального та фізичного середовищ». Це забезпечує саме той операційний механізм, якого бракує багатьом рішенням на основі навчання з підкріпленням і багатоагентного навчання: можливість безпечного навчання, валідації та аналізу сценаріїв «що буде, якщо» на цифровій копії перед впровадженням у реальній мережі ситуаційного центру.

Паралельно федеративне навчання (FedAvg) [10] формує базовий підхід до тренування моделей на розподілених даних без централізованого збирання сирих записів, що природно відповідає вимогам конфіденційності у ситуаційних центрах. Для підвищення приватності та стійкості у федеративному навчанні застосовуються методи захищеної агрегації [11], а для поєднання федеративного навчання з керуванням на основі навчання з підкріпленням [12] розробляються спеціалізовані підходи до федеративного навчання з підкріпленням на периферійних вузлах.

Отже, на стикі стандартизованого адаптивного потокового відео (DASH), формалізованих моделей оцінки якості (P.1203), сучасних транспортних протоколів (QUIC/HTTP/3), мереж цифрових двійників та федеративного й багатоагентного навчання з підкріпленням формується цілісна наукова база для переходу від ізольованих алгоритмів до інтегрованої архітектури резильєнтного керування потоками в системах ситуаційних центрів.

**Постановка завдання.** Метою дослідження є розроблення й обґрунтування інтегрованої архітектури резильєнтного керування потоковим відео та телеметрією у ситуаційних центрах, що ґрунтується на концепції мережі цифрового двійника та федеративного багатоагентного навчання політик керування якістю користувацького досвіду й резильєнтною якістю в умовах нестабільного мережевого середовища та обмежених ресурсів периферійних обчислювальних вузлів.

Для досягнення мети поставлено такі задачі:

1. Формалізувати системну модель «ситуаційний центр – периферійні вузли – агенти» та вимоги до резильєнтності на основі стандартів адаптивного потокового відео та протоколів транспортного рівня;

2. Описати архітектуру мережі цифрового двійника для ситуаційного центру з інтерфейсами взаємодії між віртуальним і фізичним середовищами та можливістю імітаційного тестування;

3. Запропонувати розширену метрику резильєнтної якості для багатопотокового режиму (RQE-M), узгоджену з показниками якості користувацького досвіду та критеріями справедливого розподілу ресурсів;

4. Сформулювати принципи багатоагентного керування потоками (локальні агенти адаптивного вибору бітрейту з кооперативною координацією);

5. Запропонувати федеративну схему навчання моделей прогнозування та керування з можливістю застосування механізмів захищеної агрегації;

6. Визначити методологію експериментальної перевірки в середовищі цифрового двійника або спеціалізованому імітаційному симуляторі, включаючи критерії якості.

## **Виклад основного матеріалу**

### **1. Архітектура системи «СЦ – периферійні вузли – агенти» та роль стандартів**

Вихідною умовою приймається, що мультимедійні потоки передаються у форматі адаптивного потокового відео (MPEG-DASH), де клієнт або периферійний проксі-вузол здійснює вибір рівня якості сегментів на основі доступної інформації про стан мережі, буфера та контексту. Стандарт ISO/IEC 23009-1 забезпечує інтероперабельність опису контенту (опис представлення медіа) та механізмів сегментації, що дозволяє зосередити увагу на політиці адаптивного вибору бітрейту як на інтелектуальному рівні керування поверх базового стандарту.

Для оцінювання якості застосовується підхід, узгоджений із рекомендацією ITU-T P.1203 (як базова об'єктивна модель оцінки якості користувацького досвіду для адаптивного потокового відео). Це дозволяє не створювати метрики «з нуля», а формувати показники резильєнтної якості як надбудову над стандартизованими компонентами (якість відео та аудіо, зупинки відтворення через буферизацію, інтегральна оцінка).

Транспортний рівень розглядається як такий, що може функціонувати поверх TCP/HTTP2 або переходити до QUIC/HTTP/3. Оскільки HTTP/3 реалізує семантику HTTP поверх протоколу QUIC, а QUIC визначає мультиплексовані потоки та механізми керування переважанням і втратами, це безпосередньо впливає на параметри, релевантні для якості користувацького досвіду (затримки, втрати пакетів, варіативність затримки). Відповідно, ці характеристики мають

бути враховані у цифровому двійнику мережі та в прогнозних моделях.

## 2. Цифровий двійник мережі як «замкнений контур» керування

Відповідно до рекомендації ITU-T Y.3090 мережа цифрового двійника визначається як віртуальне представлення фізичної мережі, придатне для аналізу, діагностики, емуляції та контролю із забезпеченням інтерактивного відображення в реальному часі між фізичною та цифровою інфраструктурою. Ключовою є підтримка замкненого контуру автоматизації: дані фізичної мережі → оновлення цифрових моделей → прийняття рішень → виконання у фізичній мережі → надходження нових даних.

Для задач ситуаційного центру пропонується реалізувати мережу цифрового двійника як сукупність моделей трьох типів:

1. Рівень даних: телеметрія мережі (пропускна здатність, затримка проходження сигналу, втрати пакетів), стани буфера клієнтів і периферійних вузлів, характеристики відеоконтенту (наприклад, складність сцени), просторовий контекст агентів;

2. Рівень моделей: моделі прогнозування (рекурентні нейронні мережі типу LSTM/GRU або інші підходи), моделі оцінки якості (узгоджені з ITU-T P.1203), моделі політики керування (навчання з підкріпленням або багатоагентне

навчання), а також моделі реконструкції відео (за потреби);

3. Прикладний рівень: сервіси ситуаційного центру (моніторинг, пріоритизація потоків, перемикання маршрутів передавання, керування ресурсами периферійних обчислювальних вузлів).

Така тріада узгоджується з ідеєю трирівневої архітектури мережі цифрового двійника (фізичний рівень – рівень цифрового двійника – прикладний рівень), що підкреслюється в рекомендації Y.3090.

На рівні інтерфейсів доцільно спиратися на вимоги до нижніх (southbound), внутрішніх та верхніх (northbound) інтерфейсів мережі цифрового двійника, сформульовані в документах IRTF/IETF щодо інтерфейсів цифрових двійників мереж. Ці документи конкретизують вимоги до форматів даних, гнучкості розгортання, внутрішньої взаємодії компонентів рівня цифрового двійника та аспектів безпеки. Діаграму концептуальної моделі наведено на рисунку 1.

## 3. Метрика резильєнтної якості для багатопотокового ситуаційного центру (RQE-M)

У попередній роботі авторів (Кармазін, Писаренко) [13] запропоновано метрику резильєнтної якості користувацького досвіду (Resilient Quality of Experience, RQE), що враховує не лише середнє

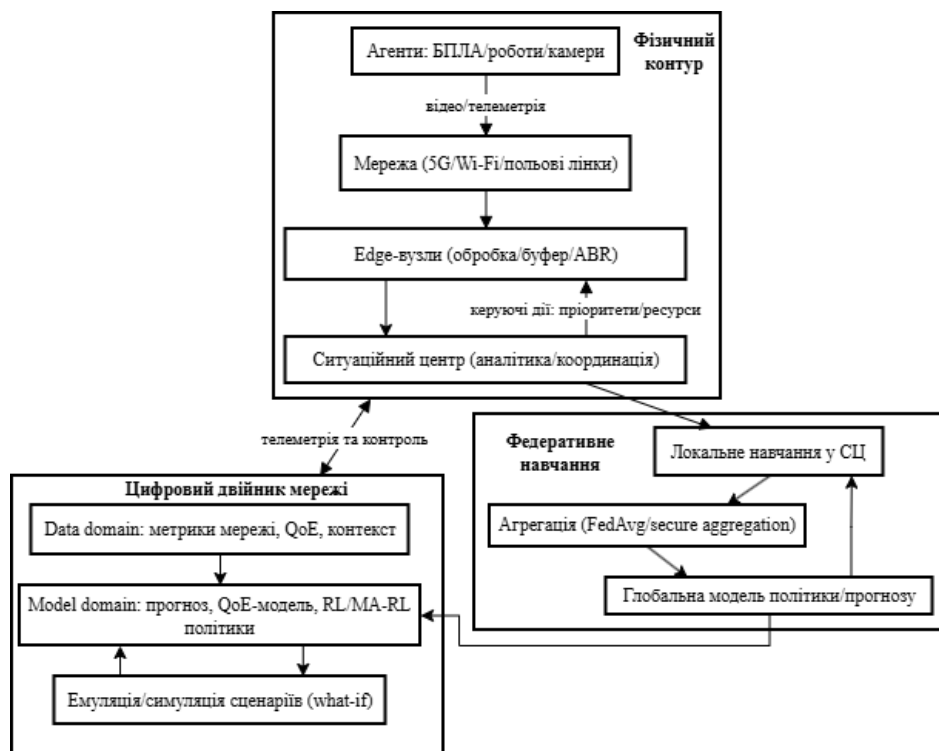


Рис. 1. Діаграма концептуальної моделі

значення показника якості, а й його стабільність у часі. У даній роботі пропонується узагальнення цієї метрики на багатопотоковий режим функціонування ситуаційного центру – RQE-M (багатопотокова резильєнтна якість), яке поєднує:

1. Індивідуальну якість  $i$ -го потоку (показник  $QoE_i$  або оцінку, розраховану відповідно до рекомендації ITU-T P.1203);
2. Стабільність (варіативність та частоту змін рівня якості);
3. Штрафи за зупинки відтворення через буферизацію та затримки для місійно-критичних потоків;
4. Компонент справедливого розподілу якості між потоками (наприклад, через дисперсію  $QoE_i$  або мінімізацію «нижніх хвостів» розподілу якості в групі).

Один з можливих формалізованих варіантів:

$$RQE - M = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \overline{QoE_i} - \lambda \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sigma(QoE_i) - \beta \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \overline{Stall_i} - \delta FairnessPenalty(QoE_1, \dots, QoE_N)$$

де  $\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \overline{QoE_i}$  – середня якість користувацького досвіду по всіх потоках;  $\sigma(QoE_i)$  – нестабільність (варіативність) якості;  $\overline{Stall_i}$  – середній час буферизації (rebuffering);  $FairnessPenalty(QoE_1, \dots, QoE_N)$  – штраф за нерівномірність якості між потоками;  $\lambda, \beta, \delta$  – вагові коефіцієнти, що задаються відповідно до пріоритетів ситуаційного центру. Ідея узгоджується з сучасними підходами багатоагентної оптимізації у відеостримінгу, де групова ціль формулюється як максимізація інтегральної якості користувацького досвіду з урахуванням справедливого розподілу ресурсів.

#### 4. Ієрархія керування потоками: локальні агенти адаптивного вибору бітрейту та кооперативна координація

На нижньому рівні (клієнт або периферійний обчислювальний вузол) функціонують локальні агенти адаптивного вибору бітрейту, які здійснюють вибір якості сегмента відео. Як базові алгоритми для порівняння доцільно використовувати буферно-орієнтовані підходи (наприклад, BOLA) та методи на основі навчання з підкріпленням (алгоритми, подібні до Pensieve).

На верхньому рівні (координатор ситуаційного центру або периферійний координатор) формується кооперативна політика розподілу мережевих і обчислювальних ресурсів між потоками. Для цього може застосовуватися багатоагентна постановка на основі градієнтних методів оптимізації політики, де агентами виступають окремі потоки або їх групи, а цільовою функцією є максимізація RQE-M.

Така ієрархічна модель методично узгоджується з підходами багатоагентного навчання з під-

кріпленням для оптимізації якості користувацького досвіду та справедливості розподілу ресурсів у системах потокового відео.

#### 5. Федеративне навчання політик і прогнозних моделей між ситуаційними центрами

З метою уникнення централізації чутливих даних (відео та телеметрії) і водночас підвищення якості моделей для різних регіональних ситуаційних центрів пропонується реалізувати федеративний цикл навчання, що включає такі етапи:

1) Локальне донавчання моделей на даних конкретного ситуаційного центру (прогнозування пропускної здатності, затримки проходження сигналу, втрат пакетів; налаштування параметрів політики адаптивного вибору бітрейту; модель оцінки стабільності якості користувацького досвіду);

2) Передача на сервер агрегації лише градієнтів або оновлень параметрів без передавання сирих даних;

3) Агрегування оновлень за схемою федеративного усереднення (FedAvg);

4) Повернення узгодженої глобальної моделі назад до ситуаційних центрів.

Метод федеративного усереднення описаний як практичний спосіб об'єднання локальних оновлень моделей і демонструє відносну стійкість до неоднорідних (non-IID) розподілів даних, що є критично важливим у разі гетерогенних умов функціонування різних ситуаційних центрів.

З урахуванням підвищених вимог до інформаційної безпеки доцільно інтегрувати механізми захищеної агрегації, які забезпечують можливість отримання сервером лише сумарного результату без доступу до окремих локальних оновлень. Практичні схеми захищеної агрегації та їх сучасні узагальнення є важливим обґрунтуванням цього компонента архітектури.

Для задач, у яких політика керування має характер навчання з підкріпленням і може потребувати мета-адаптації, можливим є застосування спеціалізованих підходів федеративного навчання з підкріпленням на периферійних вузлах (наприклад, FedMC). Водночас доцільно розглядати такі рішення як перспективний напрям або варіант реалізації, щоб не перевантажувати основну лінію аргументації.

#### 6. Генеративне відновлення як опційний модуль на периферійних вузлах

Генеративні підходи в адаптивному потоковому відео можуть розглядатися як додатковий модуль компенсації деградацій. У разі погіршення мережевих умов замість агресивного зниження

якості або накопичення зупинок відтворення через буферизацію периферійний вузол може виконувати реконструкцію або згладжування артефактів (наприклад, відновлення відсутніх фрагментів зображення чи інтерполяцію кадрів) з метою зменшення суб'єктивної деградації якості. Такий підхід узгоджується як із напрямом застосування генеративного штучного інтелекту для адаптивного потокового відео через HTTP, так і з ширшим розвитком дифузійних моделей у задачах відео обробки.

Важливим методичним аспектом для ситуаційних центрів є те, що генеративний модуль не повинен збільшувати затримку понад допустимий часовий бюджет. Тому доцільно явно задати правило активації (механізм «дозволу»), відповідно до якого реконструкція допускається лише за умов:

- 1) очікуване зменшення втрат якості користувачького досвіду або резильєнтності якості перевищує витрати, пов'язані із додатковою затримкою чи енергоспоживанням;
- 2) потік не належить до категорії наднизькозатримкових місійно-критичних потоків;
- 3) периферійний вузол має достатні обчислювальні ресурси.

Такий підхід відповідає принципу інженерної реалізованості для місійно-критичних систем та забезпечує баланс між якістю, затримкою й ресурсними обмеженнями.

### 7. Методологія експериментальної валідації в цифровому двійнику

Для відтворюваної перевірки резильєнтності пропонується експериментальна методика, що поєднує:

- 1) Мережеве моделювання та емуляцію (наприклад, використання дослідницького мережевого симулятора ns-3);
- 2) Емульовані топології та контрольні сценарії (Mininet як інструмент швидкого прототипування мережевих конфігурацій);
- 3) Робото-технічний контур для агентів (ROS 2 як де-факто стандартна програмна платформа проміжного рівня для робототехніки);
- 4) Референсну реалізацію адаптивного потокового відео (програвач dash.js із можливістю налаштування алгоритмів адаптивного вибору

бітрейту та використання правила BOLA як еталонного буферно-орієнтованого підходу).

Система показників оцінювання включає: показники якості користувацького досвіду, узгоджені з ITU-T P.1203, або наближені оцінки типу середнього експертного балу (MOS); частку часу зупинок відтворення через буферизацію; частоту та амплітуду змін рівня якості; наскрізну затримку передачі до ситуаційного центру; інтегральну метрику резильєнтності якості RQE-M; показники справедливості між потоками. Це забезпечує як стандартизовану основу оцінювання, так і специфічну для ситуаційного центру надбудову резильєнтності. План експериментів за визначеними сценаріями наведено в таблиці 1.

**Висновки.** У статті запропоновано архітектурно-методичний розвиток досліджень резильєнтних поточкових систем для ситуаційних центрів: введено мережу цифрового двійника як замкнений контур керування та валідації, а також федеративне навчання як механізм масштабування інтелектуальних політик без централізації чутливих даних. Запропонована архітектура обґрунтована міжнародними рекомендаціями щодо цифрових двійників мереж (ITU-T Y.3090) і узгоджена зі стандартами доставки мультимедійного контенту (MPEG-DASH) та оцінювання якості (ITU-T P.1203).

Показано, що для багатопотокового режиму функціонування ситуаційного центру доцільно переходити від орієнтації лише на середню якість користувацького досвіду до використання метрик резильєнтності та справедливого розподілу ресурсів (RQE-M). Контур керування доцільно будувати ієрархічно: локальні агенти адаптивного вибору бітрейту на нижньому рівні та кооперативний координатор багатоагентної оптимізації якості й справедливості на верхньому рівні. Як технологічні опції розглянуто генеративну компенсацію деградацій на периферійних вузлах та федеративне навчання з підкріпленням як перспективний напрям розвитку.

Запропоновано відтворювану методологію експериментальної перевірки, що базується на використанні цифрового двійника, мережевих

Таблиця 1

План експериментів за визначеними сценаріями

Фактор	Позначення	Рівні
Мережеві збурення	N	$N_1$ – step throughput drop; $N_2$ – bursty loss; $N_3$ – RTT variation
Кількість потоків	S	$S_1=1$ ; $S_2=5$ ; $S_3=10$ ; $S_4=20$
Пріоритет	P	$P_1$ – критичні; $P_2$ – некритичні
Транспорт	T	$T_1$ – TCP/HTTP2; $T_2$ – QUIC/HTTP3
Архітектура	A	$A_1$ – Baseline; $A_2$ – DTN; $A_3$ – DTN+FL

симуляторів та робототехнічної платформи проміжного рівня з прив'язкою до референсних реалізацій алгоритмів адаптивного вибору бітрейту. Практичне значення роботи полягає у можливості

уніфікованого порівняння політик керування потоками для різних ситуаційних центрів та підвищення стійкості інформаційного контуру прийняття рішень у реальному часі.

#### Список літератури:

1. ISO/IEC. ISO/IEC 23009-1:2022 Information technology – Dynamic adaptive streaming over HTTP (DASH). Part 1: Media presentation description and segment formats. Geneva, 2022.
2. ITU-T. Recommendation ITU-T P.1203: Parametric bitstream-based quality assessment of progressive download and adaptive audiovisual streaming services over reliable transport. Geneva, 2017.
3. IETF. RFC 9000: QUIC: A UDP-Based Multiplexed and Secure Transport. 2021.
4. IETF. RFC 9114: HTTP/3. 2022.
5. Spiteri K., Urgaonkar R., Sitaraman R. BOLA: Near-Optimal Bitrate Adaptation for Online Videos // IEEE/ACM Transactions on Networking. 2016. DOI: 10.1109/TNET.2020.2996964
6. Mao H., Netravali R., Alizadeh M. Neural adaptive video streaming with Pensieve // Proceedings of ACM SIGCOMM. 2017. DOI: 10.1145/3098822.3098843
7. Wang Y., Aggarwal V., Lan T. Learning-based online QoE optimization in multi-agent video streaming // Algorithms. 2022. Vol. 15, No. 7. P. 227. DOI: 10.3390/a15070227
8. Artioli E. Generative AI for HTTP adaptive streaming // Proceedings of ACM Multimedia Systems (MMSys). 2024. DOI: 10.1145/3625468.3652912
9. ITU-T. Recommendation ITU-T Y.3090: Digital twin network – Requirements and architecture. Geneva, 2022.
10. McMahan H. B., Moore E., Ramage D., Hampson S., Arcas B. A. Communication-efficient learning of deep networks from decentralized data // Proceedings of Machine Learning Research. 2017. Vol. 54.
11. Bonawitz K., et al. Federated learning with autotuned communication-efficient secure aggregation // IEEE Symposium on Security and Privacy. 2019. DOI: 10.48550/arXiv.1912.00131
12. Zou D., et al. FedMC: Federated reinforcement learning on the edge with meta-critic networks // IEEE IPCCC. 2022. DOI: 10.1109/IPCCC55026.2022.9894336
13. Писаренко Ю. В., Кармазін К. В. Використання ІІІ для обробки та аналізу великих обсягів даних у реальному часі з інтеграцією мультиагентних систем // Науковий журнал «Штучний інтелект». 2025. DOI: 10.15407/jai2025.04.134

#### **Pisarenko J.V., Karmazin K.V. NETWORK DIGITAL TWIN AND FEDERATED MULTI-AGENT LEARNING FOR RESILIENT VIDEO STREAMING AND TELEMETRY MANAGEMENT IN SITUATION CENTERS**

*The paper addresses the problem of applying Artificial Intelligence (AI) for real-time processing and analysis of large-scale data streams with the integration of multi-agent systems in dynamic and uncertain environments. The relevance of the research is driven by the rapid growth of data generated by unmanned aerial vehicles, robotic platforms, sensor networks, and multimedia streaming services. Under such conditions, traditional centralized data processing approaches become insufficient due to bandwidth limitations, transmission delays, packet losses, and network instability.*

*A novel concept of an intelligent resilient architecture is proposed, combining machine learning, reinforcement learning, time-series forecasting, and generative models with multi-agent coordination mechanisms. A mathematical model for optimizing system performance is developed based on a reward function that incorporates delay, packet loss, and service quality stability metrics. The study formalizes a multi-agent framework in which heterogeneous agents (UAVs, edge nodes, situational centers) interact through coordinated data flow management strategies.*

*Special attention is devoted to the creation of a digital twin of the operational environment for predicting future system states and generating adaptive control policies. It is demonstrated that the integration of generative AI models enables compensation of data losses and improves subjective quality perception without increasing network load. The proposed approach is applicable to airspace monitoring systems, technological surveillance, security infrastructures, and next-generation multimedia streaming platforms.*

*The obtained results establish a scientific and methodological foundation for the development of resilient intelligent information systems capable of self-adaptation, cooperative agent interaction, and stable operation under dynamic real-time conditions.*

**Keywords:** artificial intelligence, real-time data processing, multi-agent systems, resilience, machine learning, reinforcement learning, generative models, digital twin.

Дата першого надходження статті до видання: 08.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 03.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті 11.05.2026