Голові разової спеціалізованої вченої ради PhD 17159
Хмельницького національного університету
доктору технічних наук, доценту
Антоніні КАШТАЛЬЯН

РЕЦЕНЗІЯ

на дисертаційну роботу Качура Артема Вячеславовича на тему «Методи та засоби забезпечення резильєнтності систем доповненої та віртуальної реальності», подану на здобуття ступеня доктора філософії з галузі знань 12 Інформаційні технології за спеціальністю 123 Комп'ютерна інженерія

Актуальність теми дослідження та її зв'язок із планами наукових робіт університету. Сучасна XR-платформа є гетерогенною програмно-апаратною екосистемою реального часу, яка об'єднує шоломи з датчиками і дисплеями, контролери, обчислювальні модулі (CPU/GPU), базове програмне забезпечення, рушії рендерингу та мережеві канали зв'язку. Функціонування цього комплексу жорстко лімітоване криритичним бюджетом затримки за схемою «рух – фотон», що становить десятки мілісекунд, де допустиме вікно реакції обмежується інтервалом у кілька кадрів.

У реальній експлуатації на XR-платформу одночасно діють коливання пропускної здатності та затримки мережі, нагрівання автономних шоломів і тепловий дроселінг, розряд акумулятора, пікові обчислювальні навантаження, різкі рухи користувача. Галузева практика протидії цим впливам спирається переважно на локальні механізми: повторне проєктування кадрів, фовеальний рендеринг, динамічну зміну рівня деталізації, кешування та перенесення обчислень на межу мережі. Кожен із них покращує окремий показник, але рішення про застосування цих механізмів не пов'язане з кількісною оцінкою стану всієї системи, тому одночасне ввімкнення кількох механізмів не гарантує покращення, а може погіршити інші характеристики.

Таким чином, підвищення резильєнтності систем віртуальної та доповненої реальності потребує єдиного процесу, який поєднує кількісне оцінювання стану, локалізацію джерела деградації, обґрунтований вибір мітигаційних дій і повторну перевірку результату. Розроблення архітектури VR-системи, методів оцінювання її стану та синтезу мітигаційних стратегій є актуальною науково-прикладною задачею, що відповідає предметній області Стандарту вищої освіти України зі спеціальності 123 Комп'ютерна інженерія для третього (освітньо-наукового) рівня, зокрема в частині програмно-технічних засобів комп'ютерних систем, архітектури та організації їх функціонування, методів забезпечення надійності й безпечності.

Дослідження виконано в рамках науково-дослідної тематики Хмельницького національного університету – держбюджетної теми №1Б-2026 «Система забезпечення резильєнтності до витоку конфіденційної інформації в корпоративних мережах в умовах впливів комп'ютерних атак» (ДР № 0126U002082), у якій автор дисертації був виконавцем.

Формулювання наукової задачі, мети й задач дослідження. Здобувачем правильно визначено науково-прикладну задачу, об'єкт і предмет дослідження. Об'єктом дослідження визначено процес забезпечення резильєнтності систем віртуальної та доповненої реальності в умовах динамічно змінюваного зовнішнього середовища. Предметом дослідження визначено архітектури VR-системи та методи оцінювання стану VR-системи й синтезу мітигаційних стратегій для відновлення працездатності VR-системи в цих умовах.

Мету роботи сформульовано як забезпечення резильєнтності систем віртуальної та доповненої реальності шляхом розроблення архітектури VR-системи, методів оцінювання стану VR-системи та синтезу мітигаційних стратегій для відновлення її працездатності.

Поставлену мету досягнуто в результаті розв'язання таких задач:

– проведено аналіз існуючих архітектур XR-систем і методів оцінювання їхньої резильєнтності, виділено ключові фактори впливу та функціональні компоненти системи;

– розроблено модель резильєнтного функціонування систем віртуальної та доповненої реальності;

– розроблено метод оцінювання стану VR-системи в умовах динамічно змінюваного середовища;

– розроблено метод синтезу мітигаційних стратегій для VR-систем;

– розроблено архітектуру резильєнтних VR-систем, яка інтегрує комплекс компонентів, методи оцінювання та синтезу мітигаційних стратегій в єдиний програмно-апаратний засіб;

– реалізовано комплексний програмний засіб для автоматизованої оцінки та синтезу резильєнтності VR-системи та проведено його експериментальну верифікацію;

– апробовано запропоновані методи у прикладних VR-сценаріях та оцінено їхній вплив на загальну резильєнтність системи.

Наукова новизна одержаних автором результатів полягає в такому:

1) вперше розроблено метод синтезу мітигаційних стратегій, який, на відміну від відомих методів, здійснює мультикритеріальний Парето-ефективний синтез мітигаційних стратегій шляхом одночасної оптимізації цільових функцій параметрів резильєнтності з калібрувальними коефіцієнтами і дозволяє забезпечувати резильєнтність системи в умовах динамічно змінюваного зовнішнього середовища;

2) вперше розроблено метод оцінювання стану VR-системи, який, на відміну від відомих методів, формує інтегральний показник резильєнтності, що ґрунтується на оцінці впливу факторів динамічно змінюваного середовища на компоненти системи, і використовує систему вагових коефіцієнтів, отриману із застосуванням нечіткої логіки;

3) набула подальшого розвитку архітектура VR-систем, яка, на відміну від відомих архітектур, інтегрує комплекс компонентів, пов’язаних із програмно-апаратними засобами, методи оцінювання та синтезу мітигаційних стратегій в єдиний програмно-апаратний засіб, що дозволяє здійснювати резильєнтне функціонування систем;

4) удосконалено модель резильєнтного функціонування систем віртуальної та доповненої реальності, у якій, на відміну від відомих моделей, враховано вплив зміни стану мережі, поведінки користувачів, навантаження на систему, апаратних обмежень та факторів навколишнього середовища на апаратне і програмне забезпечення, дані та користувачів.

Короткий аналіз основного змісту дисертації. Дисертація складається з анотації, вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел і чотирьох додатків. Загальний обсяг роботи становить 208 сторінок, з них 143 сторінки основного тексту; список джерел містить 134 найменування, робота містить 15 рисунків і 37 таблиць.

У вступі обґрунтовано актуальність теми, визначено мету, задачі, об’єкт і предмет дослідження, наведено наукову новизну та практичне значення результатів.

Перший розділ присвячено аналізу сучасних підходів до забезпечення резильєнтності XR-систем. Визначено критичні функції XR-системи та показники їх виконання, класифіковано впливи, введено профілі місії (медичний, промисловий, тренувальний, розважальний) з допустимими межами деградації. Проаналізовано сім груп відомих методів – від кількісного оцінювання резильєнтності та самовідновлення програмного забезпечення до інженерії хаосу і специфічних для імерсивних систем механізмів – та зіставлено їх за вісьмома критеріями, за результатами чого сформульовано постановку задачі.

Другий розділ присвячено моделі резильєнтного функціонування та методу оцінювання стану. Запропоновано матрицю двадцяти оцінювальних функцій «фактор - компонент», інтегральний показник резильєнтності,

процедуру визначення ваг нечітким аналізом ієрархій та обґрунтування нормувальних і порогових параметрів за джерелами їх значень. Метод досліджено на Simulink-моделі для шести сценаріїв деградації, виконано аналіз чутливості та стійкості показника.

Третій розділ присвячено циклу забезпечення резильєнтності, методу синтезу мітигаційних стратегій і синтезу резильєнтних XR-архітектур. Формалізовано фази циклу, стани компонентів та оператори переходу між ними, сформульовано задачу багатокритеріальної оптимізації за сімома критеріями резильєнтності з обмеженнями. Проведено дослідження методів за чотирма операційними сценаріями та порівняння з відомими підходами, зокрема генетичного алгоритму з випадковим пошуком, пошуком на сітці та покоординатним спуском.

Четвертий розділ присвячено практичній реалізації програмно-технічного засобу у вигляді кросплатформного десктопного застосунку та верифікації програмної реалізації.

У висновках подано основні наукові та практичні результати, обмеження дослідження та перспективи подальшої роботи.

За змістом дисертаційна робота відповідає Стандарту вищої освіти зі спеціальності 123 Комп’ютерна інженерія для третього (освітньо-наукового) рівня вищої освіти, є завершеною науковою працею та свідчить про особистий внесок здобувача в науковий напрям комп’ютерної інженерії. Дисертацію оформлено відповідно до вимог наказу МОН України від 12 січня 2017 р. № 40 «Про затвердження вимог до оформлення дисертації».

Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій. Наукові положення та висновки дисертації ґрунтуються на використанні абстрактно-алгебраїчного підходу до формалізації архітектури системи, теорії множин і матричної алгебри, нечітко-логічного моделювання, методів оптимізації, дискретно-подійного та стохастичного моделювання в середовищі Simulink, а також експериментальних і статистичних методів аналізу результатів.

З інженерного погляду цінним є те, що обчислювальне ядро реалізовано двічі – у середовищі MATLAB/Simulink і на мові TypeScript, – і за уніфікованих вхідних даних розбіжність реалізацій за шістьма цільовими показниками не перевищує 1,2 %. Реалізацію перевірено на граничних значеннях порогових функцій, детермінованість обчислень і монотонність показника – на серії з 1000 випадкових профілів.

Практичне значення одержаних результатів. Практична цінність роботи полягає в тому, що розроблені модель і методи доведено до працездатного програмного засобу VR Resilience. Засіб реалізовано з обчислювальним ядром на TypeScript, інтерфейсом React і пакуванням Electron; він формує дистрибутиви для macOS, Windows та Linux і містить інтерактивну діаграму взаємодій «фактор – компонент», теплову карту матриці оцінок, модуль нечіткого аналізу ієрархій, модуль синтезу мітигаційних конфігурацій з дев’ятнадцятьма параметрами та симулятор підключення VR-пристроїв.

Засіб дає змогу розробнику XR-системи за телеметричними параметрами обчислити інтегральний показник резильєнтності, визначити взаємодію з найбільшим зваженим дефіцитом і порівняти мітигаційні конфігурації. В експериментах оптимізована конфігурація підвищила агреговану оцінку резильєнтності з 0,664 до 0,873 (на 31,5 %), зокрема модельний час відновлення скоротився на 75,2 %, а відмовостійкість зросла з 0,747 до 0,993. Результати можуть бути використані в тренувальних комплексах, медичних симуляторах, промислових системах візуалізації та під час тестування XR-систем перед розгортанням.

Теоретичні та практичні результати дослідження впроваджено в ПП «ABIBI», ТОВ «Хорайзен Дайнамікс» та в навчальний процес кафедри комп’ютерної інженерії та інформаційних систем Хмельницького національного університету.

Особистий внесок здобувача полягає в розробленні моделі резильєнтного функціонування систем віртуальної та доповненої реальності, методу оцінювання стану VR-системи, методу синтезу мітигаційних стратегій,

архітектури резильєнтних VR-систем, а також у програмній реалізації засобу VR Resilience та проведенні експериментальних досліджень. Усі наукові результати, винесені на захист, отримано автором особисто; у працях, опублікованих у співавторстві, здобувачеві належать основні ідеї, теоретична та практична розробка положень, що відображені в науковій новизні.

За результатами досліджень опубліковано 10 наукових праць, серед яких 4 статті у фахових наукових виданнях України та 6 праць у матеріалах міжнародних і всеукраїнських конференцій, 3 з яких проіндексовано в наукометричній базі Scopus.

Апробація матеріалів дисертації. Апробацію основних положень, ідей і висновків дисертаційної роботи проведено на науковому семінарі кафедри комп'ютерної інженерії та інформаційних систем Хмельницького національного університету. Результати доповідалися та обговорювалися на міжнародних і всеукраїнських наукових заходах: 2023, 2024 та 2025 IEEE International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies (DeSSerT, Афіни, Греція), 5th International Workshop on Intelligent Information Technologies and Systems of Information Security (IntelITSIS'2024), XXIV Міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми інформатики та моделювання» (ПІМ-2024), XV–XVII Всеукраїнських науково-практичних конференціях «Актуальні проблеми комп'ютерних наук» (АПКН-2023 – АПКН-2025), 2nd International Workshop on Advanced Applied Information Technologies (AdvAIT-2025) та 16th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT'2026, Злін, Чехія).

Недоліки та зауваження до дисертаційної роботи.

1. Експериментальні дослідження виконано на синтетичній телеметрії, що автор зазначає як обмеження роботи. Бажано було б детальніше описати, на підставі яких даних сформовано базові параметри симульованих пристроїв Meta Quest 3, HTC Vive Pro 2 та Valve Index (таблиця 4.7).

2. Параметричний перетворювач мітигаційного вектора містить 23 калібрувальні коефіцієнти (таблиця 4.6). Доцільно було б коротко пояснити, з

яких міркувань обрано їхні базові значення, наприклад у додатку В, що полегшило б перенесення засобу на інше обладнання.

3. Позначення одиниць часу варто уніфікувати: у Simulink-моделі тривалість сценаріїв подано в умовних одиницях (с. 92), у таблиці 3.9 – в одиницях часу моделі, а в таблиці 4.8 час відновлення позначено в секундах.

4. У структурі роботи є технічні неточності: після підрозділу 4.2 іде підрозділ 4.4, а в тексті трапляються посилання на підрозділи 4.3.2 (с. 81), 4.7.1 та 4.7.2 (с. 140, 143, 145), яких у роботі немає.

5. Формулювання п. 4 методів дослідження у вступі (с. 24) щодо алгоритму динамічного розподілу обчислювальних ресурсів між гетерогенними вузлами варто було б узгодити з текстом розділів роботи.

6. У переліку джерел є праці, на які немає посилань у тексті (наприклад, [31]–[34], [57]). Статтю 2026 року «Метод синтезу резильєнтних архітектур систем віртуальної та доповненої реальності» доцільно було б додати до списку джерел і до опису особистого внеску здобувача, а у вступі – згадати впровадження результатів у ПП «АВІВІ» та ТОВ «Хорайзен Дайнамікс».

Зазначені зауваження мають рекомендаційний характер, стосуються переважно оформлення та напрямів подальших досліджень і не впливають на загальну позитивну оцінку проведеного дослідження.

Загальний висновок. Вважаю, що дисертаційна робота Качура Артема Вячеславовича на тему «Методи та засоби забезпечення резильєнтності систем доповненої та віртуальної реальності» містить нові науково обґрунтовані теоретичні та експериментальні результати за спеціальністю 123 Комп’ютерна інженерія галузі знань 12 Інформаційні технології, які в сукупності забезпечують розв’язання актуальної науково-прикладної задачі забезпечення резильєнтності систем віртуальної та доповненої реальності.

Дисертаційна робота, подана на здобуття ступеня доктора філософії, за своїм науковим рівнем, практичною цінністю, змістом та оформленням повністю

відповідає вимогам пп. 6, 7, 8, 9 «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. № 44 (зі змінами), а її автор, Качур Артем Вячеславович, заслуговує на присудження ступеня доктора філософії за спеціальністю 123 Комп'ютерна інженерія.

Рецензент:
професор кафедри комп'ютерної інженерії
та інформаційних систем
Хмельницького національного університету,
кандидат технічних наук, доцент Дмитро МЕДЗАТИЙ

«Підпис Дмитра МЕДЗАТОГО засвідчую»:
Проректор з наукової роботи ХНУ Олег СИНЮК