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

ВІДГУК

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

Актуальність теми дисертації. Системи віртуальної та доповненої реальності (XR-системи) перетворилися на повноцінний клас кіберфізичних систем реального часу з людиною в контурі керування. Вони обробляють трекінгові та біометричні дані користувача, працюють через бездротові канали та сервіси віддаленого рендерингу, а їх збої безпосередньо відчуваються людиною у вигляді кінетозу, дезорієнтації чи ризику фізичної травми. Тому для XR-систем недостатньо класичних уявлень про надійність чи захищеність окремо: потрібна здатність передбачати впливи, витримувати їх, обмежувати наслідки та відновлювати працездатність, тобто резильєнтність у сенсі сучасних підходів інженерії кіберрезильєнтних систем.

Спектр впливів, що дестабілізують XR-систему, є широким: деградація мережі, перегрівання і розряд носимого обладнання, пікові обчислювальні навантаження, нетипова поведінка користувача, а також цілеспрямовані втручання – атаки на канал зв'язку, виснаження ресурсів, спотворення потоків даних. Відомі засоби протидії здебільшого мають локальний характер і діють у межах одного рівня архітектури: механізми самовідновлення програмного забезпечення, контури самоадаптації, апаратне резервування, компенсація пропущених кадрів. Спільної кількісної моделі стану, яка дозволяла б зіставляти

внесок різнорідних чинників, локалізувати джерело деградації та обґрунтовано обирати коригувальні дії за кількома суперечливими критеріями, наразі не запропоновано.

Відтак існує суперечність між потребою в резильєнтному функціонуванні XR-систем в умовах динамічно змінюваного зовнішнього середовища та недостатністю методів і засобів комплексного оцінювання їх стану, синтезу мітигаційних стратегій і кількісного підтвердження відновлення. Забезпечення резильєнтності систем віртуальної та доповненої реальності є актуальною науково-прикладною задачею, одним із шляхів розв'язання якої є розроблення архітектури VR-системи, методів оцінювання її стану та синтезу мітигаційних стратегій.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційну роботу виконано на кафедрі комп'ютерної інженерії та інформаційних систем Хмельницького національного університету. Її зміст відповідає тематиці науково-дослідних робіт за держбюджетною темою Хмельницького національного університету №1Б-2026 «Система забезпечення резильєнтності до витоку конфіденційної інформації в корпоративних мережах в умовах впливів комп'ютерних атак» (ДР № 0126U002082), у якій автор був виконавцем.

Оцінка обґрунтованості наукових результатів дисертації, їх достовірності та новизни. Наукова новизна результатів дисертаційного дослідження полягає в такому:

вперше розроблено:

1) 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) метод оцінювання стану VR-системи, який, на відміну від відомих методів, формує інтегральний показник резильєнтності на основі оцінки впливу

факторів динамічно змінюваного середовища на компоненти системи і використовує систему вагових коефіцієнтів, отриману шляхом застосування нечіткої логіки;

набула подальшого розвитку:

3) 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;

удосконалено:

4) модель резильєнтного функціонування систем віртуальної та доповненої реальності, у якій, на відміну від відомих моделей, враховано вплив таких зовнішніх факторів, як зміна стану мережі, поведінка користувачів, навантаження на систему, апаратні обмеження та фактори навколишнього середовища, на основні компоненти системи – апаратне та програмне забезпечення, дані та користувачів.

Наукові положення, висновки та рекомендації дисертаційної роботи Качура А. В. достатньо обґрунтовані. Для розв'язання поставленої задачі здобувач використав абстрактно-алгебраїчний метод формалізації архітектури, теорію множин і матричну алгебру, нечітко-логічне моделювання на основі трикутних нечітких чисел, методи багатокритеріальної оптимізації та генетичні алгоритми, стохастичне моделювання в середовищі MATLAB/Simulink, а також експериментальні та статистичні методи аналізу результатів.

Заслуговує на увагу те, що оцінювання стану, локалізацію критичної взаємодії, синтез мітигації та повторне оцінювання об'єднано в замкнений цикл з формально визначеними станами компонентів (номінальний, деградований, мітигований, новий усталений) та операторами переходу між ними. Кіберзагрози в моделі враховано через їх вимірювані наслідки: атака на канал зв'язку проявляється через затримку, джитер і втрати пакетів, виснаження ресурсів – через системне навантаження, маніпуляція сенсорними потоками – через

аномальну поведінку. Такий підхід дає змогу використовувати єдиний обчислювальний апарат незалежно від природи впливу.

Достовірність запропонованих методів підтверджується результатами моделювання шести сценаріїв деградації в Simulink та чотирьох операційних сценаріїв у програмному засобі, порівнянням нечіткого та класичного аналізу ієрархій (розбіжність модальних ваг не більше 4 % за повного збігу ранжування), порівнянням генетичного алгоритму з альтернативними методами пошуку за однакового бюджету 2000 обчислень цільової функції, а також контрольним розрахунком двох незалежних реалізацій із розбіжністю не більше 1,2 %.

Наукові положення, висновки та рекомендації логічно випливають з отриманих результатів. Автор коректно окреслює межі їх застосовності, наголошуючи на синтетичному характері телеметрії та потребі натурної перевірки. Поставлене наукове завдання виконано, а здобувач повною мірою оволодів методологією наукової діяльності.

Оцінка змісту дисертації, її завершеність та дотримання принципів академічної доброчесності. За змістом дисертаційна робота Качура А. В. відповідає Стандарту вищої освіти зі спеціальності 123 Комп'ютерна інженерія для третього (освітньо-наукового) рівня вищої освіти та освітньо-науковій програмі Хмельницького національного університету «Комп'ютерна інженерія». Дисертація є завершеною науковою працею і свідчить про особистий внесок здобувача в науковий напрям комп'ютерної інженерії.

Дисертаційна робота є результатом самостійних досліджень здобувача і не містить ознак фальсифікації, фабрикації чи плагіату. Використані ідеї, результати і тексти інших авторів мають посилання на відповідні джерела.

Практичне значення одержаних результатів. Практичне значення роботи полягає в доведенні теоретичних положень до програмного засобу VR Resilience, який реалізує оцінювання стану XR-системи, визначення вагових коефіцієнтів, локалізацію критичних взаємодій та синтез мітигаційних конфігурацій. Засіб дає змогу виявляти пару «фактор – компонент» з найбільшим внеском у дефіцит резильєнтності та порівнювати альтернативні конфігурації за надійністю,

доступністю, відмовостійкістю, цілісністю даних, часом відновлення, стабільністю продуктивності та безпекою користувача.

Результати можуть бути використані розробниками XR-систем та фахівцями випробувальних лабораторій для навчальних і тренувальних комплексів, медичних симуляторів, промислових систем візуалізації, а також для перевірки конфігурацій мережевої та обчислювальної інфраструктури XR-сервісів перед розгортанням. Результати дисертаційної роботи впроваджено в ПП «АВІВІ», ТОВ «Хорайзен Дайнамікс» та в навчальний процес Хмельницького національного університету.

Мова та стиль викладення результатів. Дисертаційну роботу написано українською мовою, логічно та послідовно, із використанням сучасної науково-технічної термінології. Стиль викладу відповідає вимогам до наукових текстів, матеріал достатньою мірою проілюстровано рисунками і таблицями.

Дисертація складається з анотації, змісту, переліку умовних скорочень, вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел із 134 найменувань на 15 сторінках та 4 додатків на 30 сторінках. Загальний обсяг роботи становить 208 сторінок друкованого тексту, з них 143 сторінки основного тексту. Дисертація містить 15 рисунків та 37 таблиць. Робота оформлена відповідно до вимог наказу МОН України від 12 січня 2017 р. № 40 «Про затвердження вимог до оформлення дисертації».

Оприлюднення результатів дисертаційної роботи. Основні результати дисертації опубліковано в 10 наукових працях, 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.

Результати дисертаційної роботи апробовано на міжнародних та всеукраїнських наукових заходах, зокрема на 2023, 2024 та 2025 IEEE International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies (DeSSerT), 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), Всеукраїнських науково-практичних конференціях «Актуальні проблеми комп'ютерних наук» (АПКН-2023, АПКН-2024, АПКН-2025), 2nd International Workshop on Advanced Applied Information Technologies (AdvAIT-2025) та 16th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT'2026).

Опубліковані праці віддзеркалюють основні результати дисертації, у публікаціях дотримано принципів академічної доброчесності.

Недоліки та зауваження до дисертаційної роботи:

1. Кібернетичні впливи в моделі враховано через їх вимірювані наслідки для мережі, навантаження, даних і поведінки (с. 59), що є обґрунтованим підходом. Водночас у подальших дослідженнях було б корисно доповнити набір модельних сценаріїв (таблиці 2.3, 3.3) сценаріями цілеспрямованих атак, наприклад відмовою в обслуговуванні каналу потокового передавання або підміною трекінгових даних.

2. Розглядаючи підготовку телеметрії (с. 69–70), автор приділяє увагу пропускам і застарілості даних. Перспективним напрямом розвитку методу є також перевірка цілісності й автентичності телеметричних даних перед обчисленням оцінювальних функцій.

3. Набір оцінювальних функцій для компонента даних можна було б у подальшому розширити показником конфіденційності та автентичності трекінгових і біометричних даних, які автор відносить до критичних функцій (таблиця 1.1).

4. Бажано було б навести відомості про експертів, судження яких покладено в основу базових матриць парних порівнянь (с. 81), зокрема їх кількість і спосіб узгодження оцінок.

5. Генетичний алгоритм порівняно з випадковим пошуком, пошуком на сітці та покоординатним спуском (таблиця 3.13), і він показав найкращий результат. Цікавим напрямом подальшої роботи було б також зіставлення з багатокритеріальними еволюційними алгоритмами, наприклад NSGA-II.

6. У пункті 1.3.5 огляд методів апаратної надлишковості ілюстровано прикладами з космічної електроніки та цифрових фільтрів для оброблення сигналів ЕКГ [24, 25]; доцільно було б доповнити його прикладами, безпосередньо пов'язаними з XR-обладнанням.

7. Трапляються англіцизми та термінологічні неузгодженості: назви сценаріїв «Default», «Ideal», «Stress», «Network failure» у таблицях 3.3–3.8 подано англійською; вжито звороти «тротлінгове підвищення навантаження» (с. 93), «граційна деградація» (с. 116); позначення VR і XR у назвах підрозділів використано не завжди відповідно до домовленості, наведеної на с. 36. У тексті також є окремі граматичні та пунктуаційні помилки.

Наведені зауваження мають переважно дискусійний характер і окреслюють напрями подальших досліджень; вони не є принциповими, не впливають на зміст дисертаційної роботи і не знижують її наукової та практичної цінності.

Висновок про дисертаційну роботу. Вважаю, що дисертаційна робота здобувача наукового ступеня доктора філософії Качура Артема Вячеславовича на тему «Методи та засоби забезпечення резильєнтності систем доповненої та віртуальної реальності» виконана на належному науковому рівні, не порушує принципів академічної доброчесності та є закінченим науковим дослідженням, сукупність теоретичних і практичних результатів якого розв'язує науково-прикладну задачу, що має істотне значення для галузі інформаційних технологій.

Дисертаційна робота за актуальністю, практичною цінністю та науковою новизною повністю відповідає вимогам чинного законодавства України, передбаченим пп. 6–9 «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).

Здобувач Качур Артем Вячеславович заслуговує на присудження наукового ступеня доктора філософії в галузі знань 12 Інформаційні технології за спеціальністю 123 Комп'ютерна інженерія.

Офіційний опонент:
доцент кафедри кібербезпеки
та інтелектуальних інформаційних технологій
факультету радіоелектроніки, комп'ютерних систем
та інфокомунікацій
Національного аерокосмічного університету
«Харківський авіаційний інститут»,
кандидат технічних наук Артем ТЕЦЬКИЙ

Підпис к.т.н. Тецького Артема Григоровича засвідчую

Учений секретар
Національного аерокосмічного університету
«Харківський авіаційний інститут» Тетяна БОНДАРЄВА

М.П. «__» листопада 2026 року