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

РЕЦЕНЗІЯ

на дисертаційне дослідження Качура Артема Вячеславовича на тему «Методи та засоби забезпечення резильєнтності систем доповненої та віртуальної реальності», подане 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. Системи віртуальної та доповненої реальності (XR-системи) давно вийшли за межі розважальної галузі: їх використовують для підготовки хірургів і операторів складного обладнання, у дистанційному промисловому обслуговуванні, у вищій освіті. У таких застосуваннях раптова деградація імерсивного середовища має не лише технічну, а й безпекову ціну, адже падіння частоти кадрів, зростання затримки «рух – фотон» чи втрата позиційного відстеження безпосередньо впливають на самопочуття користувача.

Особливістю XR-систем як об'єкта дослідження є одночасна дія мережевих, середовищних, поведінкових, навантажувальних та апаратних чинників на апаратне і програмне забезпечення, потоки даних і людину, яка перебуває всередині контуру керування. Ці чинники мають різну фізичну природу і розмірність, тому їх спільне врахування потребує формалізованого зведення до єдиної нормованої шкали. Відомі методи кількісного оцінювання резильєнтності, самовідновлення програмного забезпечення, самоадаптивні архітектури та методи апаратного резервування розв'язують окремі частини цієї задачі, але не утворюють узгодженого математичного апарату, у якому

оцінювання стану, локалізація джерела деградації та вибір коригувальних дій спиралися б на спільну модель.

Отже, існує суперечність між потребою забезпечити резильєнтне функціонування XR-систем в умовах динамічно змінюваного середовища та відсутністю формалізованих методів оцінювання їх стану й синтезу мітигаційних стратегій. Її подолання шляхом розроблення архітектури VR-системи, методів оцінювання 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 вищої освіти.

Дисертаційне дослідження виконано в межах держбюджетної науково-дослідної теми Хмельницького національного університету №1Б-2026 «Система забезпечення резильєнтності до витоку конфіденційної інформації в корпоративних мережах в умовах впливів комп'ютерних атак» (номер державної реєстрації 0126U002082), у якій здобувач був виконавцем.

Формулювання наукової задачі, мети й задач дослідження. Здобувач коректно визначив об'єкт і предмет дослідження. Об'єктом дослідження є процес забезпечення резильєнтності систем віртуальної та доповненої реальності в умовах динамічно змінюваного зовнішнього середовища. Предметом дослідження є архітектури VR-системи та методи оцінювання стану VR-системи й синтезу мітигаційних стратегій для відновлення її працездатності в зазначених умовах.

Метою роботи є забезпечення резильєнтності систем віртуальної та доповненої реальності шляхом розроблення архітектури VR-системи, методів оцінювання її стану та синтезу мітигаційних стратегій для відновлення працездатності в умовах динамічно змінюваного зовнішнього середовища.

Для досягнення мети розв'язано такі задачі: 1) проаналізовано архітектури XR-систем і методи оцінювання їхньої резильєнтності, виділено ключові фактори впливу та функціональні компоненти системи; 2) розроблено модель резильєнтного функціонування систем віртуальної та доповненої реальності; 3)

розроблено метод оцінювання стану VR-системи в умовах динамічно змінюваного середовища; 4) розроблено метод синтезу мітигаційних стратегій для VR-систем; 5) розроблено архітектуру резильєнтних VR-систем, що об'єднує компоненти, методи оцінювання та синтезу мітигаційних стратегій в єдиний програмно-апаратний засіб; 6) реалізовано програмний засіб автоматизованого оцінювання та синтезу резильєнтності VR-системи й проведено його експериментальну верифікацію; 7) апробовано запропоновані методи на прикладних VR-сценаріях.

Мета, задачі, об'єкт і предмет дослідження взаємоузгоджені, а перелік задач відповідає структурі наукової новизни.

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 на основі оцінки 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 і факторів навколишнього середовища на основні компоненти системи – апаратне та програмне забезпечення, дані та користувачів.

З погляду математичного апарату слід відзначити послідовне використання безрозмірних оцінювальних функцій на інтервалі [0; 1], трактування інтегрального показника як опуклої комбінації двадцяти оцінок та встановлені автором аналітичні властивості показника: обмеженість, монотонність, адитивну декомпозицію дефіциту та ліпшицевість з одиничною константою (формули (2.38)–(2.41)). Саме ці властивості обґрунтовують використання показника як вхідної величини замкненого контуру керування.

Короткий аналіз основного змісту дисертації. У вступі обґрунтовано актуальність теми, наведено мету, задачі, об’єкт, предмет і методи дослідження, сформульовано наукову новизну та практичне значення результатів, описано особистий внесок здобувача, апробацію та публікації.

У першому розділі введено означення резильєнтності XR-системи через збереження критичних функцій, перехід у контрольований деградований режим і відновлення у встановлений час. Критичні функції систематизовано в таблиці, впливи класифіковано за походженням, часовим характером і спостережуваністю, а профіль місії формалізовано четвіркою, що включає мінімально допустимий рівень показника виконання критичної функції; рівнем, який має бути відновлено; граничним часом відновлення; та вектор коефіцієнтів значущості критичних функцій. Сім груп відомих методів зіставлено за вісьмома критеріями, що дало змогу обґрунтовано сформулювати постановку задачі.

У другому розділі XR-систему подано впорядкованою четвіркою диз’юнктних множин компонентів – апаратне забезпечення, програмне забезпечення, компоненти даних, та компоненти користувачів – на які діють п’ять груп факторів. Для кожної з двадцяти пар «фактор – компонент» запропоновано оцінювальну функцію порогового, відносного або композитного типу (формули (2.9)–(2.28)). Інтегральний показник визначено як зважену суму елементів матриці оцінок, а вагові коефіцієнти – нечітким аналізом ієрархій на трикутних нечітких числах з перевіркою узгодженості модального зрізу. Метод

досліджено на Simulink-моделі для шести сценаріїв деградації: за номінального значення 0,86 найглибше просідання, до 0,51, отримано у сценарії втрати мережі.

У третьому розділі цикл забезпечення резильєнтності формалізовано чотирма фазами, множинами процесів і станами компонентів з операторами переходу. Задачу синтезу сформульовано як багатокритеріальну оптимізацію за сімома критеріями: надійністю, доступністю, відмовостійкістю, цілісністю даних, часом відновлення, стабільністю продуктивності та безпекою користувача. Для пошуку розв’язку застосовано генетичний алгоритм. За чотирма операційними сценаріями інтегральний показник резильєнтності набуває значень від 0,184 до 0,944, а для оптимізованої конфігурації мітигації агрегована оцінка зростає з 0,664 до 0,873, тобто на 31,5 %.

У четвертому розділі описано програмний засіб VR Resilience з обчислювальним ядром на TypeScript, інтерфейсом на React і пакуванням Electron. Засіб реалізує двадцять оцінювальних функцій, нечіткий аналіз ієрархій, параметричний перетворювач мітигаційного вектора та симулятор підключення VR-пристроїв. Контрольний розрахунок за однакових вхідних даних показав розбіжність із Simulink-реалізацією не більше 1,2 %.

У висновках узагальнено отримані результати, окреслено обмеження дослідження та напрями подальших робіт.

Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій. Наукові положення дисертації спираються на коректне застосування теорії множин і матричної алгебри для формалізації структури системи, апарату нечіткої логіки та методу аналізу ієрархій для визначення вагових коефіцієнтів, методів багатокритеріальної оптимізації та імітаційного моделювання. Позитивно, що для кожної оцінювальної функції автор наводить аналітичний приклад і явно окреслює межі її інтерпретації, а обчислювальні властивості реалізації перевірено набором граничних і випадкових тестів (додаток В: 16 граничних випадків і 1000 випадкових профілів). Достовірність результатів підтверджується узгодженістю двох незалежних реалізацій

обчислювального ядра, апробацією на міжнародних конференціях та впровадженням.

Практичне значення одержаних результатів. Теоретичні положення доведено до програмного засобу, який дає змогу оцінювати стан XR-системи, локалізувати критичну пару «фактор – компонент» за найбільшим зваженим дефіцитом і порівнювати мітигаційні конфігурації за сімома критеріями резильєнтності. Результати можуть використовувати розробники XR-систем, інженери з надійності та випробувальні лабораторії, зокрема під час створення освітніх і тренувальних комплексів, медичних симуляторів і промислових систем візуалізації.

Результати дослідження впроваджено у діяльність ПП «ABIBI» та ТОВ «Хорайзен Дайнамікс», а також у навчальний процес кафедри комп'ютерної інженерії та інформаційних систем Хмельницького національного університету під час викладання дисциплін «Системне програмне забезпечення» та «Об'єктно-орієнтовані технології програмування», що підтверджено відповідними актами.

Особистий внесок здобувача. Усі основні результати, винесені на захист, отримано автором особисто. У працях, опублікованих у співавторстві, здобувачеві належать формулювання викликів оптимізації архітектури VR-систем, математична модель резильєнтного функціонування з урахуванням впливу динамічно змінюваного середовища, інтегральний показник резильєнтності та спосіб агрегування функцій впливу, процесна модель забезпечення резильєнтності, а також методи підвищення безпеки й резильєнтності архітектури VR-систем.

Апробація матеріалів дисертації. Основні положення роботи обговорено на науковому семінарі кафедри комп'ютерної інженерії та інформаційних систем Хмельницького національного університету. Результати доповідалися на міжнародних і всеукраїнських конференціях, зокрема IEEE International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies (DeSSerT-2023,

DeSSerT-2024, DeSSerT-2025, Афіни, Греція), IntelITSIS’2024, ПІМ-2024, АПКН-2023, АПКН-2024, АПКН-2025, AdvAIT-2025 та ACIT’2026 (Злін, Чехія).

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

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається з анотації, змісту, переліку умовних скорочень, вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел із 134 найменувань та 4 додатків. Загальний обсяг роботи становить 208 сторінок, з них 143 сторінки основного тексту. Робота містить 15 рисунків і 37 таблиць.

Зауваження. За результатами розгляду дисертації сформовано такі зауваження та рекомендації.

1. На етапі оцінювання стану використано адитивну згортку оцінювальних функцій (2.30), а на етапі синтезу компонентні значення критеріїв формуються мультиплікативно (3.25). Такий вибір є цілком виправданим з огляду на різне призначення етапів, проте в роботі варто було б коротко пояснити його мотивацію; це полегшило б сприйняття взаємозв’язку між показниками R_{VR} і S_{agg}.

2. Під час глобального нормування ваг (2.37) прийнято рівну сумарну важливість чотирьох компонентів системи. Для базового профілю це припущення є природним; у подальших дослідженнях доцільно розглянути можливість задавати різну значущість компонентів залежно від профілю місії, наприклад через другий рівень ієрархії.

3. Оцінку чутливості інтегрального показника до похибок експертних ваг (2.42) наведено у готовому вигляді. Для повноти викладу бажано було б навести її виведення, наприклад у додатку.

4. Частину оцінювальних функцій ((2.10), (2.13), (2.18), (2.22), (2.25)) задано як порогові. Це відповідає характеру відповідних обмежень, однак у подальшому можна розглянути їх гладкі апроксимації з перехідною зоною, що зробило б реакцію показника поблизу порогових значень плавнішою.

5. У позначеннях трапляються окремі неточності: у виразі (3.11) індекс рядка позначено як $i \in H$ замість групи факторів; на с. 112 індекс j використано двічі в описі елемента матриці Mat; на с. 77 кортеж компонентів пов’язано з формулою (2.6), хоча його введено формулою (2.1). Бажано також пояснити співвідношення між матрицею M (3.11) і мітигаційним вектором M_1–M_{20} (таблиця 4.5).

6. Є окремі редакційні недоліки: функцію (2.17) на с. 64 названо «ймовірністю нормального функціонування», хоча оцінювальні функції не мають імовірнісного змісту; після таблиці 2.1 іде таблиця 2.3; у таблиці 1.1 (с. 32) повторено рядок «Цілісність і захищеність даних»; трапляються описки («мітігаційних», с. 100; с. 88).

Висловлені зауваження стосуються переважно повноти обґрунтування окремих математичних положень та оформлення, не зачіпають суті отриманих результатів і не знижують загальної позитивної оцінки роботи.

Загальний висновок. Вважаю, що дисертаційна робота Качура Артема Вячеславовича на тему «Методи та засоби забезпечення резильєнтності систем доповненої та віртуальної реальності» є завершеною кваліфікаційною науковою працею, яка містить нові науково обґрунтовані теоретичні та експериментальні результати в галузі знань 12 Інформаційні технології. У сукупності ці результати забезпечують розв’язання актуальної науково-прикладної задачі забезпечення резильєнтності систем віртуальної та доповненої реальності шляхом розроблення архітектури VR-системи, методів оцінювання її стану та синтезу мітигаційних стратегій.

Дисертаційна робота 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:
кандидат фізико-математичних наук, доцент,
доцент кафедри комп'ютерної інженерії
та інформаційних систем
Хмельницького національного університету Тетяна КИСІЛЬ

Підпис Тетяни КИСІЛЬ засвідчую
Проректор з науково-педагогічної роботи
Хмельницького національного університету Віктор ЛОПАТОВСЬКИЙ