Голові разової спеціалізованої вченої ради PhD 17159
Хмельницького національного університету
доктору технічних наук, доценту
Антоніні КАШТАЛЬЯН
29016, м. Хмельницький, вул. Інститутська, 11

**ВІДГУК ОФІЦІЙНОГО ОПОНЕНТА**

**доктора технічних наук, професора Поночовного Юрія Леонідовича на дисертаційну роботу Качура Артема Вячеславовича «Методи та засоби забезпечення резильєнтності систем доповненої та віртуальної реальності», подану до захисту на здобуття наукового ступеня доктора філософії з галузі знань 12 Інформаційні технології за спеціальністю 123 Комп'ютерна інженерія**

**1. Актуальність теми дисертаційної роботи**

Розвиток теорії гарантоздатних систем поступово зміщує акцент із класичних показників надійності, готовності та відмовостійкості на резильєнтність – здатність системи зберігати критичні функції під дією впливів, переходити в контрольований деградований режим і відновлювати заданий рівень працездатності у визначений час. Такий підхід особливо важливий для систем, у яких повна відмова є неприйнятною, а тимчасова часткова деградація – допустимою за умови її контролю.

Системи віртуальної та доповненої реальності належать саме до цього класу. Це кіберфізичні системи реального часу, у контурі керування яких перебуває людина, а наслідки деградації проявляються не лише у зниженні продуктивності, а й у погіршенні самопочуття та безпеки користувача. У медичних, промислових і тренувальних застосуваннях допустима глибина деградації та граничний час відновлення відрізняються в рази, тому оцінювання резильєнтності має враховувати профіль місії.

Наявні методи кількісного оцінювання резильєнтності здебільшого оперують уже сформованим агрегованим показником і не визначають способу

його отримання з різнорідних вимірюваних параметрів XR-середовища. Методи самовідновлення та самоадаптації задають структуру реакції, але не містять формалізованого синтезу конфігурації за кількома суперечливими критеріями, а засоби апаратного резервування орієнтовані переважно на окремі тракти обладнання. Тому розроблення архітектури VR-системи, методів оцінювання її стану та синтезу мітигаційних стратегій для відновлення працездатності в умовах динамічно змінюваного зовнішнього середовища є актуальною науково-прикладною задачею.

Ця задача відповідає предметній області Стандарту вищої освіти України зі спеціальності 123 Комп'ютерна інженерія для третього (освітньо-наукового) рівня вищої освіти.

**2. Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами**

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

**3. Наукова новизна отриманих результатів**

До основних наукових результатів дисертаційної роботи слід віднести такі:

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

– вперше розроблено метод оцінювання стану VR-системи, який, на відміну від відомих, формує інтегральний показник резильєнтності на основі оцінки впливу факторів динамічно змінюваного середовища на компоненти системи та використовує систему вагових коефіцієнтів, отриману шляхом застосування нечіткої логіки;

– набула подальшого розвитку архітектура VR-систем, яка, на відміну від відомих, 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 модель резильєнтного функціонування систем віртуальної та доповненої реальності, у якій, на відміну від відомих, враховано вплив зміни стану мережі, поведінки користувачів, навантаження на систему, апаратних обмежень та факторів навколишнього середовища на апаратне та програмне забезпечення, дані та користувачів.

**4. Короткий аналіз основного змісту дисертації**

Науковий рівень викладення дисертації відповідає вимогам МОН України. Назва дисертації адекватно відображає її зміст.

У вступі обґрунтовано актуальність теми, визначено мету, об’єкт, предмет і задачі дослідження, наведено наукову новизну та практичне значення одержаних результатів, відомості про особистий внесок здобувача, апробацію та публікації.

У першому розділі сформульовано означення резильєнтності XR-системи та умови збереження функціонування і завершеного відновлення. Введено профіль місії і наведено орієнтовні межі деградації для медичного, промислового, тренувального та розважального застосувань. Проаналізовано сім груп відомих методів забезпечення резильєнтності та здійснено їх зіставлення за множиною критеріїв, на основі якого визначено три прогалини – в оцінюванні стану, виборі дій і кількісній перевірці відновлення.

У другому розділі розроблено модель резильєнтного функціонування у вигляді матриці двадцяти безрозмірних оцінювальних функцій п’яти груп факторів щодо чотирьох компонентних множин, метод оцінювання стану на основі інтегрального показника та процедуру визначення вагових коефіцієнтів нечітким аналізом ієрархій. Наведено обґрунтування нормувальних і порогових параметрів, результати моделювання шести сценаріїв деградації в Simulink, а також аналітичні оцінки чутливості та стійкості показника.

У третьому розділі формалізовано ітераційний цикл забезпечення резильєнтності з фазами оцінювання стану, локалізації вузьких місць, синтезу мітигаційної стратегії та переоцінювання. Уведено множину станів компонента, оператори деградації, мітигації, повного і часткового відновлення та відкату, а також граф переходів. Сформульовано задачу синтезу як багатокритеріальну оптимізацію за надійністю, доступністю, відмовостійкістю, цілісністю, часом відновлення, стабільністю продуктивності та безпекою користувача з обмеженнями. Досліджено методи за чотирма операційними сценаріями та порівняно запропоновані рішення з відомими.

У четвертому розділі описано програмно-технічний засіб VR Resilience, його архітектуру, модулі оцінювальних функцій, нечіткого аналізу ієрархій та параметричного перетворювача, інтерфейс користувача, симулятор VR-пристроїв і верифікацію програмної реалізації.

У висновках наведено основні наукові та практичні результати, а також обмеження дослідження, пов’язані з синтетичною телеметрією та модельними профілями впливів.

**5. Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, їх достовірність**

Сформульовані в дисертації наукові положення, висновки та рекомендації є аргументованими і ґрунтуються на аналізі 134 літературних джерел, чіткій постановці задач дослідження та коректному застосуванні математичного апарату теорії множин, теорії надійності, нечіткої логіки та багатокритеріальної оптимізації.

Позитивно оцінюю те, що автор не обмежився побудовою показника, а дослідив його формальні властивості: обмеженість на $[0; 1]$, монотонність, адитивну декомпозицію дефіциту для локалізації критичної взаємодії, ліпшицевість відносно похибок оцінювальних функцій та оцінку чутливості до варіації експертних ваг. Важливим є також явне розмежування контрольованого деградованого режиму та відмови: стратегія, що підвищує інтегральний показник ціною втрати критичної функції, визнається недопустимою.

Достовірність результатів у межах заданої синтетичної параметризації підтверджено моделюванням сценаріїв деградації, порівнянням нечіткого та класичного аналізу ієрархій, порівнянням генетичного алгоритму з альтернативними методами пошуку (найкращий агрегований показник 0,873 за 520 обчислень до досягнення 95 % найкращого результату та розкиду 0,006 за 10 запусків), контрольним порівнянням двох реалізацій обчислювального ядра (TypeScript і Simulink) за уніфікованих вхідних даних (розбіжність не перевищує 1,2%), а також апробацією на міжнародних конференціях і впровадженням. Натурна перевірка на фізичному стенді визначена автором як напрям подальших досліджень.

**6. Практичні результати роботи**

У роботі реалізовано програмний засіб VR Resilience з обчислювальним ядром на TypeScript, інтерфейсом React і пакуванням Electron, а також Simulink-модель для динамічної перевірки. Засіб обчислює двадцять оцінювальних функцій та інтегральний показник резильєнтності, визначає вагові коефіцієнти нечітким аналізом ієрархій, локалізує критичну пару «фактор – компонент» і оцінює мітигаційні конфігурації за сімома критеріями резильєнтності.

За чотирма операційними сценаріями показник стану $R_{VR}$ набуває значень від 0,184 (мультифакторна деградація) до 0,944 (ідеальні умови), що підтверджує здатність методу розрізняти ступені деградації. Оптимізована мітигаційна конфігурація підвищує агреговану оцінку резильєнтності з 0,664 до 0,873 (на 31,5%), зокрема модельна надійність зростає на 43,9%, а модельний час відновлення (у модельних одиницях часу) скорочується на 75,2%.

Теоретичні та практичні результати дослідження впроваджено в ПП «АВІВІ», ТОВ «Хорайзен Дайнамікс» та в навчальний процес кафедри комп’ютерної інженерії та інформаційних систем Хмельницького національного університету в дисциплінах «Системне програмне забезпечення» та «Об’єктно-орієнтовані технології програмування».

**7. Оформлення дисертації, дотримання вимог академічної доброчесності та повнота викладу наукових положень та результатів в опублікованих працях**

Дисертаційна робота складається з анотації, змісту, переліку умовних скорочень, вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел із 134 найменувань та чотирьох додатків. Повний обсяг роботи становить 208 сторінок друкованого тексту, з них основний текст – 146 сторінок. Дисертація містить 15 рисунків та 37 таблиць. Оформлення дисертації загалом відповідає встановленим вимогам.

У дисертації не виявлено текстових запозичень і використання наукових результатів інших науковців без посилань на відповідні джерела. Окремо слід відзначити відкритість викладу: у додатках наведено повні вихідні дані, контрольні розрахунки та програмний код обчислювального ядра, що забезпечує можливість відтворення отриманих результатів.

За результатами досліджень опубліковано 10 наукових праць, у тому числі 4 статті у фахових наукових виданнях України та 6 праць у матеріалах міжнародних і всеукраїнських конференцій, 3 з яких проіндексовано в наукометричній базі Scopus. Основні положення дисертації повністю викладено в опублікованих працях.

**8. Мова та стиль дисертаційної роботи**

Текст дисертації викладено в логічній послідовності, мова і стиль відповідають вимогам до наукових праць. Матеріал проілюстровано схемами, графіками, діаграмами та таблицями. Тема, зміст і отримані результати відповідають спеціальності 123 Комп’ютерна інженерія галузі знань 12 Інформаційні технології.

**9. Зауваження та дискусійні положення щодо змісту дисертації**

Загалом позитивно оцінюючи роботу, вважаю за потрібне висловити такі зауваження та дискусійні положення:

1. Надійність у (3.14) описано експоненційним законом $R(t) = e^{-\lambda t}$ зі сталою інтенсивністю відмов $\lambda$, що є загальноприйнятим для порівняльного аналізу конфігурацій. У подальших дослідженнях доцільно розглянути також

моделі зі змінною інтенсивністю відмов, наприклад розподіл Вейбулла, які враховують тепловий режим і зношування XR-обладнання.

2. Граф переходів станів компонента (рисунок 3.2) добре структурує цикл забезпечення резильєнтності. Перспективним напрямом розвитку роботи є доповнення його інтенсивностями переходів, що дасть змогу побудувати марковську модель і оцінити коефіцієнт готовності з урахуванням деградованих режимів.

3. Відмовостійкість (3.16) оцінено за біноміальною моделлю «$k$ з $n$» для незалежних каналів. Було б корисно обговорити, як на отримані оцінки можуть вплинути відмови зі спільної причини та приховані відмови.

4. Рисунки 2.3 і 2.4 наочно ілюструють динаміку просідання та відновлення інтегрального показника. Доцільно було б доповнити їх числовими значеннями мір резильєнтності, розглянутих у розділі 1, зокрема глибини просідання та часу повернення до необхідного рівня $q_{\text{req}}$.

5. Для сценаріїв Simulink-моделювання (таблиця 2.4) бажано було б зазначити кількість прогонів і розкид результатів, як це зроблено для генетичного алгоритму в таблиці 3.13.

6. Формулювання у висновках до розділів 2 (с. 99) і 3 (с. 138–139) варто було б точніше узгодити з пунктами наукової новизни та описом умов експериментів у підрозділі 3.4: зокрема, у висновках до розділу 2 згадано оцінку обчислювальної складності методу, яка в основному тексті розділу не наведена, а у висновках до розділу 3 перевірку віднесено до середовища MATLAB/Simulink, тоді як експерименти підрозділу 3.4 виконано на обчислювальному ядрі TypeScript. Трапляються також окремі неточності у позначеннях (наприклад, символ $A$ використано і для фази циклу, і для стану компонента).

Зазначені зауваження не є принциповими, мають здебільшого дискусійний характер і не знижують наукової новизни та практичної цінності отриманих результатів.

**Висновки щодо дисертації загалом**

Представлена дисертаційна робота «Методи та засоби забезпечення резильєнтності систем доповненої та віртуальної реальності» є завершеною науково-дослідною роботою, яка містить нові науково обґрунтовані результати. У дисертації розв'язано актуальну науково-прикладну задачу 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.

Отримані наукові та практичні результати є значущими для галузі знань 12 Інформаційні технології загалом і спеціальності 123 Комп'ютерна інженерія зокрема.

Отже, з огляду на актуальність теми, обґрунтованість наукових положень, висновків і рекомендацій, їх новизну та практичну цінність, повноту викладу в опублікованих працях та відсутність порушень академічної доброчесності, вважаю, що дисертація 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 йому наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 123 Комп'ютерна інженерія.

Офіційний опонент – доктор технічних наук, професор,
професор кафедри інформаційних систем та технологій
Полтавського державного аграрного університету Юрій ПОНОЧОВНИЙ

«11» 11 2026 р.