

<https://doi.org/10.31891/2219-9365-2025-83-62>

УДК 637.5.02

ЛИСЕНКО Сергій

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0001-7243-8747>

e-mail: sirogyk@ukr.net

КАЧУР Артем

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0002-4658-2056>

e-mail: kachurav@khmnu.edu.ua

МОДЕЛЬ ВІДМОВОСТІЙКОГО ФУНКЦІОНУВАННЯ СИСТЕМ ВІРТУАЛЬНОЇ РЕАЛЬНОСТІ В КОНТЕКСТІ ВПЛИВУ ДИНАМІЧНО ЗМІНЮВАНОВОГО СЕРЕДОВИЩА

В роботі розглядається проблема забезпечення відмовостійкості систем віртуальної реальності в умовах динамічно змінюваного середовища. Запропонована формалізована модель враховує вплив зовнішніх факторів, таких як мережеві умови, поведінка користувачів, навантаження на систему, апаратні обмеження та фактори навколишнього середовища, на основні компоненти системи, включаючи апаратне та програмне забезпечення, дані та користувачів.

Описано побудову векторних та матричних структур для моделювання взаємодії між компонентами системи та джерелами впливу. Особливу увагу приділено інтеграції моделі із сучасними системами підтримки прийняття рішень, що дозволяє автоматизувати процес аналізу та вибору оптимальних стратегій для мінімізації негативного впливу зовнішніх факторів.

Крім того, застосування методів нечіткої логіки дозволяє враховувати невизначеність та неточність вхідних даних, що характерно для реальних умов експлуатації VR-систем. Отримані результати створюють основу для підвищення адаптивності, продуктивності та надійності VR-систем, забезпечуючи їхню здатність ефективно функціонувати навіть за несприятливих умов.

У дослідженні також розглянуто концепцію динамічної адаптації VR-систем до змін у зовнішньому середовищі. Враховано різні сценарії експлуатації, що включають як нормальні умови функціонування, так і екстремальні ситуації, які можуть виникати у процесі використання технологій віртуальної реальності.

Описано підходи до розробки механізмів контролю та моніторингу стану системи в реальному часі, що дозволяє своєчасно ідентифікувати потенційні загрози та здійснювати коригувальні дії. Запропонована модель може бути використана у поєднанні з алгоритмами машинного навчання для автоматизації прийняття рішень та прогнозування можливих ризиків.

Результати дослідження підтверджують ефективність розробленої методології та її потенційне застосування у широкому спектрі VR-додатків, включаючи системи симуляції, навчання, розваг і промислового використання.

Ключові слова: віртуальна реальність, резильєнтність, відмовостійкість, зовнішні фактори, формалізація моделі, системи підтримки прийняття рішень, нечітка логіка.

LYSENKO Serhii, KACHUR Artem

Khmelnytskyi National University

A MODEL OF FAULT-TOLERANT FUNCTIONING OF VIRTUAL REALITY SYSTEMS IN THE CONTEXT OF THE IMPACT OF A DYNAMICALLY CHANGING ENVIRONMENT

The study examines the problem of ensuring the fault tolerance of virtual reality systems in dynamically changing environments. The proposed formalized model takes into account the influence of external factors such as network conditions, user behaviour, system load, hardware constraints, and environmental factors on the key components of the system, including hardware, software, data, and users.

The methodology for constructing vector and matrix structures to model the interaction between system components and influencing factors is described. Special attention is given to integrating the model with modern decision-support systems, which allows for the automation of the process of analysing and selecting optimal strategies to minimize the negative impact of external factors.

Furthermore, the application of fuzzy logic methods enables the consideration of uncertainty and imprecision in input data, which is typical for real-world VR system operation. The obtained results form a basis for enhancing the adaptability, performance, and reliability of VR systems, ensuring their ability to function effectively even under unfavourable conditions.

The study also thoroughly examines the concept of dynamic adaptation of VR systems to changes in the external environment. Various operational scenarios are considered, including both normal operating conditions and extreme situations that may arise during the use of virtual reality technologies.

Additionally, approaches to the development of mechanisms for real-time system monitoring and control are described, allowing for the timely identification of potential threats and the implementation of corrective actions. The proposed model can be used in combination with machine learning algorithms to automate decision-making and predict possible risks.

The research results confirm the effectiveness of the developed methodology and its potential application in a wide range of VR applications, including simulation systems, education, entertainment, and industrial use.

Keywords: virtual reality, resilience, fault tolerance, external factors, model formalization, decision support systems, fuzzy logic.

Стаття надійшла до редакції / Received 01.08.2025
Прийнята до друку / Accepted 24.08.2025

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ У ЗАГАЛЬНОМУ ВИГЛЯДІ ТА ЇЇ ЗВ'ЯЗОК ІЗ ВАЖЛИВИМИ НАУКОВИМИ ЧИ ПРАКТИЧНИМИ ЗАВДАННЯМИ

Системи віртуальної та доданої реальності (VR/AR) є складними технологіями реального часу, що вимагають високої стійкості до збоїв та зовнішніх впливів. Їхня здатність обробляти дані в межах суворо визначених часових рамок є критичною, оскільки навіть незначні затримки можуть призвести до втрати реалістичності, дезорієнтації користувача або надмірного навантаження на систему. У критичних сферах, таких як медицина чи авіація, такі збої можуть мати катастрофічні наслідки [1].

Складність VR/AR-систем зумовлена великою кількістю взаємопов'язаних апаратних, програмних і мережевих компонентів. Кожен із цих елементів повинен функціонувати злагоджено, адже відмова навіть одного компонента може порушити роботу всієї системи. Крім того, зовнішні фактори, такі як енергозабезпечення та стан мережі, можуть впливати на стабільність системи. Тому важливою є інтеграція механізмів, що забезпечують продовження роботи під час відмови одного або декількох компонентів, а також врахування впливу зовнішніх факторів [2].

Оскільки VR/AR-системи часто обробляють персональні та біометричні дані користувачів, забезпечення їхньої резильєнтності повинно включати методи захисту ключових компонентів. Це передбачає впровадження технологій шифрування, моніторингу стану системи та адаптивного управління, які мінімізують ризики втрати даних чи витоку інформації [3].

Формалізація моделі функціонування VR/AR-систем є необхідною для розуміння взаємозв'язків між їхніми компонентами та впливу зовнішніх факторів. Використання формальних описових технік, таких як інтерактивні об'єктні графи, дозволяє моделювати взаємодію та діалоги в VR-додатках, що сприяє підвищенню їхньої надійності та ефективності [4].

Інтеграція механізмів самовідновлення, резервування та адаптації дозволяє підтримувати функціональність VR/AR-систем навіть за динамічних і нестабільних умов. Це включає швидке відновлення після збоїв, можливість адаптуватися до змін у середовищі або відмови компонентів, а також розробку стратегій управління навантаженням. Завдяки цьому забезпечується безперервна робота систем, навіть коли виникають несподівані проблеми [5].

Одним із підходів до підвищення стійкості VR/AR-систем є використання багатокомп'ютерних систем для протидії шкідливому програмному забезпеченню та кібератакам [6]. Запропонована концепція включає інтеграцію антивірусних приманок і пасток, що дозволяє виявляти метаморфічні віруси та підвищувати рівень безпеки корпоративних VR/AR-мереж [6].

Використання технологій штучного інтелекту для аналізу поведінки IoT-пристроїв у VR-системах дозволяє виявляти потенційні загрози ще на етапі їх виникнення [7]. Аналіз споживання енергії таких пристроїв є ефективним методом для виявлення атак на мережеві інфраструктури VR/AR [8].

Важливим напрямком є впровадження методів синтезу систем обману для захисту VR/AR-компонентів [9]. Це забезпечує підвищену стійкість до атак, що здійснюються шляхом компрометації мережевих та обчислювальних ресурсів VR/AR-середовища [9].

Формування структурованих підходів до моделювання стійкості VR/AR-систем дозволяє враховувати складні залежності між апаратними, програмними та мережевими складовими [10]. Додатково, використання машинного навчання для виявлення кіберзагроз у VR/AR дозволяє підвищити рівень безпеки та мінімізувати ризики компрометації системи [11].

Дослідження у сфері інтелектуальних систем інформаційної безпеки показали ефективність підходів до децентралізації обробки даних та управління стійкістю VR/AR-систем, що дозволяє забезпечити їхню безперервну роботу в умовах постійних загроз [12].

Огляд сучасних методів підвищення надійності VR/AR-систем та їхня адаптація до мінливих зовнішніх умов є важливим напрямком подальших досліджень [13].

ОГЛЯД ПОВ'ЯЗАНИХ РОБІТ

Архітектура систем віртуальної реальності (VR) є багатоплановою структурою, що забезпечує інтеграцію апаратних та програмних компонентів для створення імерсивного користувацького досвіду. Вона включає широкий спектр технологій, які забезпечують плавну взаємодію користувача з віртуальним середовищем, надаючи можливість точного рендерингу, просторового звуку та інтерактивних механік. Основні компоненти таких систем включають пристрої введення та виведення, обчислювальні платформи, програмне забезпечення для рендерингу та мережеві інфраструктури. Для забезпечення реалістичності VR-систем використовуються спеціалізовані алгоритми оптимізації відображення, що дозволяють мінімізувати затримки та збільшувати продуктивність обчислень. У дослідженнях [14]-[17] розглядаються різні аспекти впровадження VR-технологій в архітектурну освіту, підкреслюючи їхній вплив на покращення візуалізації та розуміння просторових концепцій, а також їхню роль у моделюванні реальних фізичних об'єктів.

У роботах [18]-[21] досліджується використання VR для вивчення античної архітектури, зокрема римських житлових будинків. Використовуючи VR та геоінформаційні системи (GIS), дослідники змогли глибше зрозуміти візуальне сприйняття та просторову організацію римських домівок, що демонструє потенціал VR у наукових дослідженнях архітектурної спадщини. Також розглядається можливість створення інтерактивних VR-екскурсій, які дозволяють користувачам зануритися у середовище минулих епох, вивчаючи деталі архітектурних рішень. Це відкриває нові перспективи у сфері музейної справи, археології та реставрації культурних пам'яток, підвищуючи ефективність освітнього процесу та збереження історичних даних.

Дослідження [22]-[25] присвячені викликам, що виникають при розробці та застосуванні VR-технологій. Автори аналізують технічні проблеми, пов'язані з розробкою високоякісного апаратного та програмного забезпечення, а також фінансові та етичні бар'єри, що перешкоджають повноцінній реалізації потенціалу VR у різних галузях. Окрім цього, значна увага приділяється проблемі кібернетичної безпеки VR-середовищ, оскільки зростаюча популярність цих технологій робить їх потенційними мішенями для зловмисників. Обговорюються способи захисту VR-платформ від атак, а також питання дотримання конфіденційності персональних даних користувачів, які активно взаємодіють із віртуальними середовищами.

У статтях [26]-[29] розглядається інтеграція технологій віртуальної реальності в систему інтерактивного навчання. Автори розробили посібники для реалізації інтеграції VR-технологій у проекти, що дозволяє покращити взаємодію користувача з віртуальним середовищем та забезпечити паралельну роботу підсистем без зависань програми. Особливу увагу приділено застосуванню VR у медичній освіті, де вона дозволяє створювати реалістичні тренажери для підготовки лікарів та хірургів. Крім того, VR-технології використовуються для моделювання надзвичайних ситуацій, таких як пожежі чи катастрофи, що дозволяє навчати спеціалістів правильним діям у кризових обставинах.

Нарешті, у роботах [30]-[33] досліджується архітектура безпеки Інтернету речей (IoT) на основі туманних обчислень, які надають ефективні та безпечні послуги для багатьох користувачів IoT. Хоча основна увага приділяється IoT, принципи, описані в цих статтях, можуть бути застосовані для забезпечення безпеки та ефективності VR-систем, особливо в умовах розподілених обчислень та мережевих інфраструктур. Досліджується також можливість інтеграції VR із штучним інтелектом, що дозволяє створювати більш адаптивні та персоналізовані віртуальні середовища. Завдяки цьому користувачі можуть отримувати унікальний досвід, який максимально відповідає їхнім потребам та очікуванням, забезпечуючи високу ефективність та комфорт роботи у VR-просторі.

Формалізована модель компонентів системи та впливу зовнішнього середовища

Забезпечення відмовостійкості систем віртуальної та доданої реальності є складним завданням, що потребує попереднього чисельного аналізу та оцінки. Ці системи характеризуються багатокомпонентною структурою, яка включає апаратні, програмні та мережеві елементи, що взаємодіють між собою. Ефективне функціонування такої системи можливе лише за умови детального аналізу кожного з її компонентів. Це передбачає оцінку ключових параметрів, таких як здатність до адаптації, енергетична ефективність, продуктивність і взаємозалежність із іншими елементами системи.

Одним із важливих етапів цього процесу є розрахунок інтегрального показника відмовостійкості, який забезпечує комплексне уявлення про загальний стан системи. Такий показник враховує індивідуальні характеристики компонентів та їхню здатність протидіяти зовнішнім впливам, дозволяючи виявляти слабкі місця системи та оптимізувати їх. Оцінка цього показника забезпечує можливість цілеспрямованого застосування методів і засобів, спрямованих на мінімізацію негативного впливу на окремі компоненти.

Отримані результати створюють підґрунтя для розробки адаптивних стратегій управління відмовостійкістю. Це включає впровадження механізмів моніторингу стану системи в режимі реального часу, що дозволяють оперативно реагувати на потенційні збої та відхилення. Крім того, такі підходи сприяють забезпеченню стабільної роботи системи в умовах змінного середовища, зберігаючи її продуктивність і надійність. Особливу актуальність ці процеси мають для застосування в критичних галузях, таких як медицина, транспорт або оборона, де відмовостійкість є ключовим фактором безпеки та ефективності.

Важливим кроком у розробці механізмів забезпечення відмовостійкості є формалізація моделі функціонування системи. Формальна модель дозволяє описати взаємозв'язки між компонентами, врахувати вплив зовнішніх факторів і оцінити загальну стійкість системи. Використання таких моделей дає змогу не лише проводити кількісну оцінку роботи системи, але й створювати базу для її подальшої оптимізації та автоматизації процесів управління.

Розглянемо досліджувану систему як вектор-рядок VR :

$$VR = [H, S, D, U] \quad (1)$$

де H – апаратне забезпечення, S – програмне забезпечення, D – компоненти даних, U – користувачі.

Кожен із зазначених компонентів системи взаємодіє з іншими складовими і складається з певного набору елементів. Зокрема, до апаратного забезпечення належать VR-гарнітури, контролери, сенсори та пристрої для обробки даних; до програмного забезпечення – операційні системи, низькорівневі програми та інші програмні модулі. Водночас функціонування кожного з компонентів системи може зазнавати негативного впливу зовнішніх чинників, що, у свою чергу, позначається на загальній працездатності всієї системи. Розглянемо вектор-стовпець E джерел такого впливу:

$$E = \begin{bmatrix} E_N \\ E_{ENV} \\ E_B \\ E_S \\ E_{HW} \end{bmatrix} \quad (2)$$

де E_N – фактори, пов’язані із станом мережі зв’язку (пропускна здатність, затримки, тощо); E_{ENV} – вплив зовнішнього середовища (освітлення, фоновий шум, простір); E_B – поведінка користувача (закономірності рухів, частота взаємодії); E_S – навантаження на систему (кількість одночасно запущених процесів, необхідна кількість ресурсів, тощо); E_{HW} – апаратні обмеження (обчислювальна потужність, стан акумуляторів, температурні обмеження і т.д.).

Кожен із зазначених чинників може впливати на роботу будь-якого компонента системи; при цьому наслідки такого впливу визначаються як рівнем критичності самого чинника, так і ступенем залежності конкретного компонента від змін, викликаних відповідним джерелом впливу. Для опису впливу цих джерел на кожен із компонентів системи доцільно використовувати векторну модель, де кожен вектор відображає ступінь впливу певного джерела на відповідний компонент. Надалі ці вектори можуть бути об’єднані в матрицю, яка відобразатиме всі взаємодії між джерелами впливу та компонентами системи. Таким чином, отримаємо:

$$M_E = \begin{bmatrix} E_N \times H & E_N \times S & E_N \times D & E_N \times U \\ E_{ENV} \times H & E_{ENV} \times S & E_{ENV} \times D & E_{ENV} \times U \\ E_B \times H & E_B \times S & E_B \times D & E_B \times U \\ E_S \times H & E_S \times S & E_S \times D & E_S \times U \\ E_{HW} \times H & E_{HW} \times S & E_{HW} \times D & E_{HW} \times U \end{bmatrix} \quad (3)$$

Вплив зовнішніх умов на відмовостійкість функціонування компонентів архітектури систем віртуальної реальності

Матриця, представлена у (2), відображає взаємозв’язок між джерелами зовнішнього впливу та компонентами системи. Вона демонструє, як кожне джерело впливає на конкретний компонент, а також дозволяє оцінити загальну залежність системи від змінного середовища. Такий підхід є важливим для ідентифікації вразливих елементів і визначення критичних точок, що потребують додаткової уваги.

Необхідним є детальний аналіз кожної взаємодії, відображеної в матриці (2), з метою глибшого розуміння характеру впливів та їхньої ролі у функціонуванні системи. Цей аналіз закладає основу для розробки оптимальних механізмів забезпечення відмовостійкості, адаптації системи до зовнішніх змін та мінімізації негативних наслідків. кожну взаємодію більш детально.

Розглянемо потенційний негативний вплив мережевих умов (E_N) на апаратне забезпечення ($E_N \times H$). Мережеві умови впливають на ефективність апаратного забезпечення, особливо у сценаріях реального часу, де важливими є пропускна здатність і затримка. Вплив мережевих умов на програмне забезпечення ($E_N \times S$) полягає у зміні часу реагування програмних компонентів, що може призводити до збільшення затримок. Проблеми з мережею також можуть впливати на передачу даних, і, як результат, їх цілісність, що зумовлює вплив стану мережі на компоненти даних ($E_N \times D$). Вплив мережевих умов на користувачів ($E_N \times U$) зумовлений тим, що якість мережі безпосередньо впливає на досвід користувача.

Розглядаючи вплив факторів навколишнього середовища (E_{ENV}), важливо відмітити такі фактори, як їх вплив на апаратне забезпечення ($E_{ENV} \times H$) – умови середовища, такі як температура та шум, можуть знижувати продуктивність апаратного забезпечення, викликаючи перегрів або помилкові спрацювання

датчиків; вплив на програмне забезпечення ($E_{ENV} \times S$) – фактори середовища опосередковано впливають на програмне забезпечення через апаратне забезпечення, зменшуючи обчислювальну потужність; $E_{ENV} \times D$ – вплив середовища на дані – негативні умови середовища можуть погіршувати якість зібраних даних, наприклад, візуальної чи звукової інформації; та вплив середовища на компоненти, пов’язані з користувачами ($E_{ENV} \times U$) – такі фактори, як освітлення та шум, впливають на комфорт користувача.

Опишемо такий фактор впливу, як поведінка користувачів (E_B). Вплив його на апаратне забезпечення ($E_B \times H$) полягає в тому, що часті взаємодії можуть перевантажувати апаратне забезпечення, збільшуючи енергоспоживання та знос компонентів. Фактор впливу поведінки користувачів на програмне забезпечення ($E_B \times S$) – програмне забезпечення має адаптуватися до різної поведінки користувачів; невдала ж адаптація може призводити до затримок або помилок в сприйнятті команд. Вплив поведінки на дані ($E_B \times D$) – поведінка користувачів може генерувати різні обсяги даних, що вимагає надійної обробки для підтримки продуктивності. Вплив же поведінки користувачів на користувацький досвід, а також інших користувачів ($E_B \times U$) пов’язаний з тим, що швидкі взаємодії можуть викликати дискомфорт, особливо у випадках, коли система чутлива до затримок.

Наступним з описаних факторів впливу є навантаження на систему (E_S). Вплив цього фактору на апаратне забезпечення ($E_S \times H$) полягає в тому, що високе навантаження може викликати перегрів або скорочення терміну служби; на програмне забезпечення ($E_S \times S$) – в тому, що зростання навантаження знижує продуктивність програмного забезпечення, що може призводити до зниження частоти кадрів або аварійних зупинок; на дані ($E_S \times D$) – в зниженні здатності системи під високим навантаженням ефективно обробляти дані, що може призвести до їх пошкодження; на користувачі ($E_S \times U$) – в тому, що перевантаження системи спричиняє затримки, знижуючи залученість користувачів.

Вплив апаратних обмежень (E_{HW}) на апаратне забезпечення ($E_{HW} \times H$) є найбільшим. Обмеження, такі як час роботи від батареї та температурні ліміти, безпосередньо впливають на стабільність і продуктивність апаратного забезпечення. Програмне забезпечення ($E_{HW} \times S$) під дією апаратних обмежень має лімітований функціонал, що зменшує загальну ефективність. Обмеження апаратного забезпечення можуть призводити до зберігання недостатньої кількості даних або сповільнення їх обробки, що описує їх вплив на компоненти даних ($E_{HW} \times D$). Вплив апаратних обмежень на користувачів ($E_{HW} \times U$) полягає в тому, що користувачі можуть відчувати вплив апаратних обмежень як зниження продуктивності або якості зображення, що погіршує їх досвід.

Таким чином, взаємодія компонентів системи віртуальної реальності із зовнішніми чинниками визначає їхню загальну ефективність та стабільність. Мережеві умови, фактори навколишнього середовища, поведінка користувачів, системне навантаження та апаратні обмеження впливають на кожен із компонентів системи — апаратне й програмне забезпечення, дані та досвід користувачів. Мережеві проблеми можуть викликати затримки, погіршення цілісності даних та зниження якості користувацького досвіду, тоді як несприятливі умови середовища, такі як температура та шум, впливають переважно на апаратне забезпечення, але також опосередковано позначаються на роботі програмного забезпечення і зібраних даних.

Крім того, поведінка користувачів і системне навантаження створюють додатковий тиск на всі компоненти системи, що може призводити до зниження продуктивності, перегріву, зростання затримок і навіть аварійних зупинок. Апаратні обмеження, такі як час автономної роботи чи ліміти продуктивності, також впливають на роботу системи, обмежуючи її функціональні можливості та погіршуючи загальний користувацький досвід. Усі ці фактори формують складну систему взаємозв’язків, де кожен компонент залежить від стану інших, а також від умов, що визначають стабільність системи в цілому.

Узагальнюючи проведений аналіз, можна стверджувати, що взаємодію компонентів системи віртуальної реальності із зовнішніми впливами та загальну архітектуру системи доцільно представити у візуалізованій формі. На рисунку 1 наочно продемонстровано структуру системи, її основні компоненти та їхню взаємодію із зовнішніми чинниками. Такий підхід дозволяє краще зрозуміти функціональну організацію системи, ідентифікувати найбільш вразливі елементи та оцінити їхню роль у забезпеченні відмовостійкості.

Ця схема може слугувати основою для подальшого моделювання, аналізу та оптимізації системи, забезпечуючи більш чітке уявлення про її структуру і взаємозв’язки, а також полегшуючи розробку практичних рекомендацій для підвищення її надійності та ефективності.

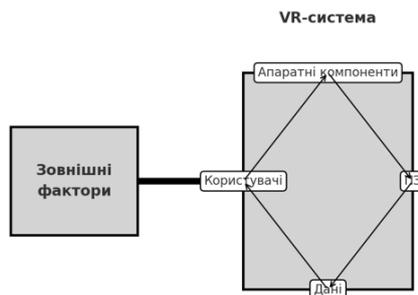


Рис. 1. Схема функціонування системи віртуальної та доданої реальності

Задавши умовний показник відмовостійкості системи R_{VR} , задачу максимізації відмовостійкості можна визначити наступним чином:

$$F(R_{VR}) = R_{VR} \rightarrow \max \quad (4)$$

Даний показник повинен бути обчислений з урахуванням деякої кількості вхідних параметрів, що впливають на функціонування системи. Методи обчислення загального показника відмовостійкості функціонування системи є темою для подальших досліджень. На етапі моделювання застосовано експериментальний показник, що представлено у наступному розділі.

Експериментальне підтвердження моделі методом імітаційного моделювання

Проведено експериментальне підтвердження працездатності запропонованої моделі функціонування системи віртуальної реальності (VR). Для цього використано імітаційне моделювання в середовищі MATLAB за допомогою бібліотеки Simulink, що дозволило дослідити динаміку змін параметрів системи під впливом зовнішніх факторів.

Для підтвердження ефективності моделі було розглянуто такі сценарії роботи VR-системи, як нормальний режим роботи (усі параметри змінюються в межах допустимих значень), а також позаштатні ситуації, що включають:

- Перевантаження мережі (втрата пакетів, збільшення затримки);
- Перегрів апаратного забезпечення (різке зростання температури);
- Непередбачувана поведінка користувача (різкі рухи, підвищене навантаження на систему);
- Перевищення допустимого навантаження (вихід за межі продуктивності системи).

Для моделювання використано 13 вхідних параметрів системи, що задані динамічно змінюваними нормально розподіленими випадковими величинами. Список параметрів представлений у таблиці 1.

Таблиця 1

Вхідні параметри моделювання функціонування системи віртуальної реальності

Позначення	Опис	Середнє значення	Дисперсія
Стан мережі			
B	Пропускна здатність мережі, Мбіт/с	1000	2
L	Затримка, мс	20	1
P_loss	Втрата пакетів, %	1	0,5
Умови навколишнього середовища			
T_env	Температура, °C	20	2,5
N_noise	Рівень шуму, дБ	30	5
L_light	Рівень освітленості, лк	500	10
Поведінка користувача			
V	Об'єм згенерованих рухами даних, ГБ	20	1
M	Розбіжність у рухах користувача	2	0,1
Навантаження системи			
C_load	Поточне навантаження на систему	0,3	0,001
D_size	Об'єм даних, ГБ	5	0,3
Апаратні обмеження			
T_hw	Температура системи, °C	35	2,5
P	Споживана потужність, Вт	35	3
B_life	Заряд батареї, %	90	1

Описано функції для оцінки впливу кожного з факторів на компоненти системи, а також виведений загальний показник відмовостійкості R , що коливається в межах від 0 до 1. При цьому описано 6 сценаріїв позаштатної ситуації – відмова мережі, перегрів, перевантаження системи, погані навколишні умови, некоректна поведінка користувача та помилка обробки даних. Кожна з позаштатних ситуацій негативно впливає на описані вище показники і стається в момент, час якого дорівнює половині загального часу моделювання. Схема моделювання роботи системи представлена на рисунку 2.

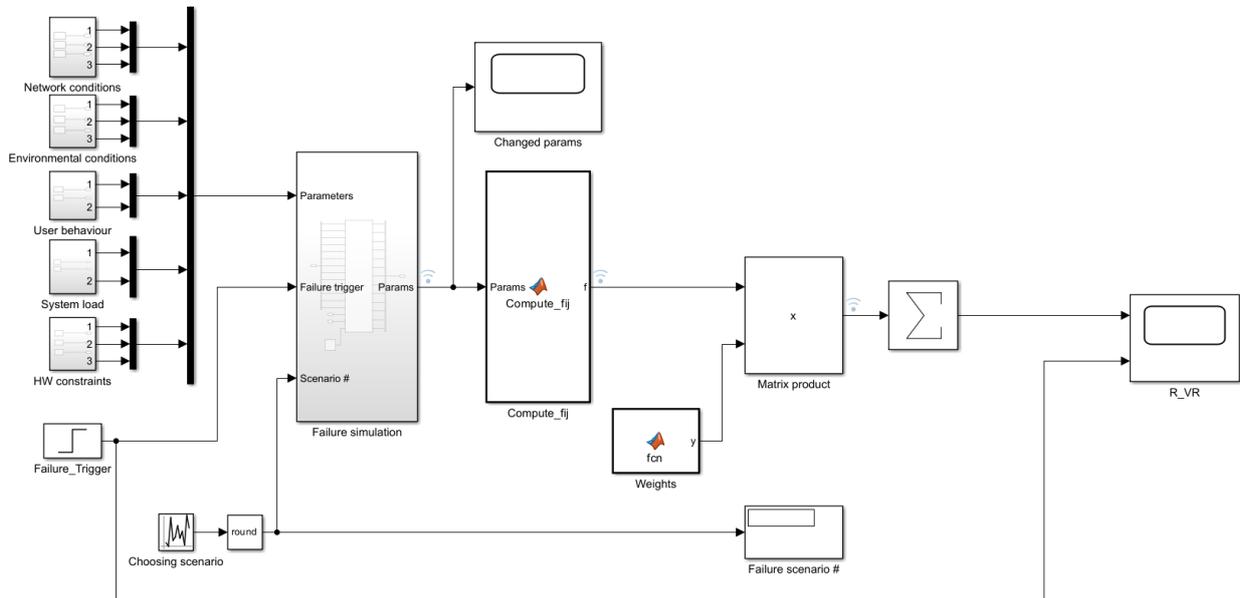


Рис. 2. Схема імітаційного моделювання системи віртуальної та доданої реальності

Розглянемо сценарій із перевантаженням системи (рисунок 3). Під час нормального функціонування системи загальний показник відмовостійкості коливається в межах 0,9. В момент $t=2500$, при загальному часі моделювання 5000 часових одиниць, спрацьовує тригер відмови, і загальний показник знижується до рівня 0,78.

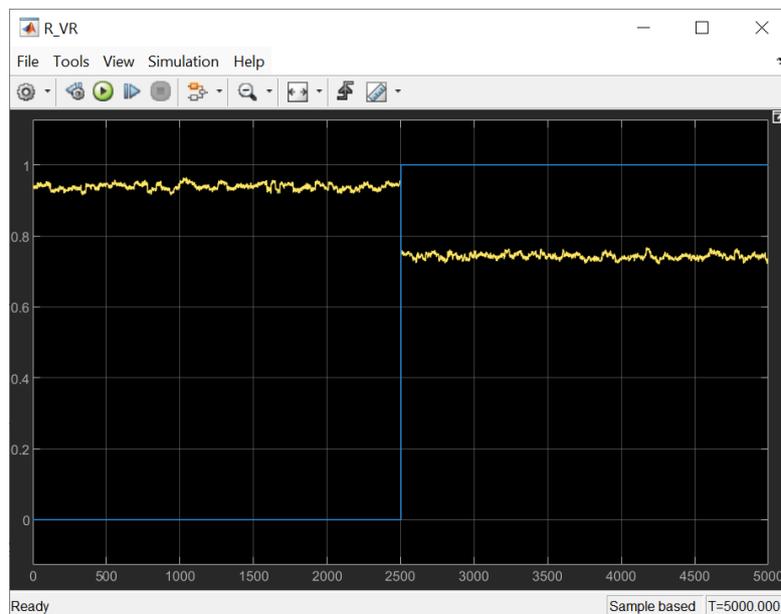


Рис. 3. Графік загального показника відмовостійкості (сценарій з перевантаженням системи)

Сценарій з перегрівом основних компонентів системи також викликає сильне зниження загального показника в результаті погіршення вхідних параметрів. Таким чином, показник відмовостійкості починає коливатись на рівні 0,68 (рисунок 4).

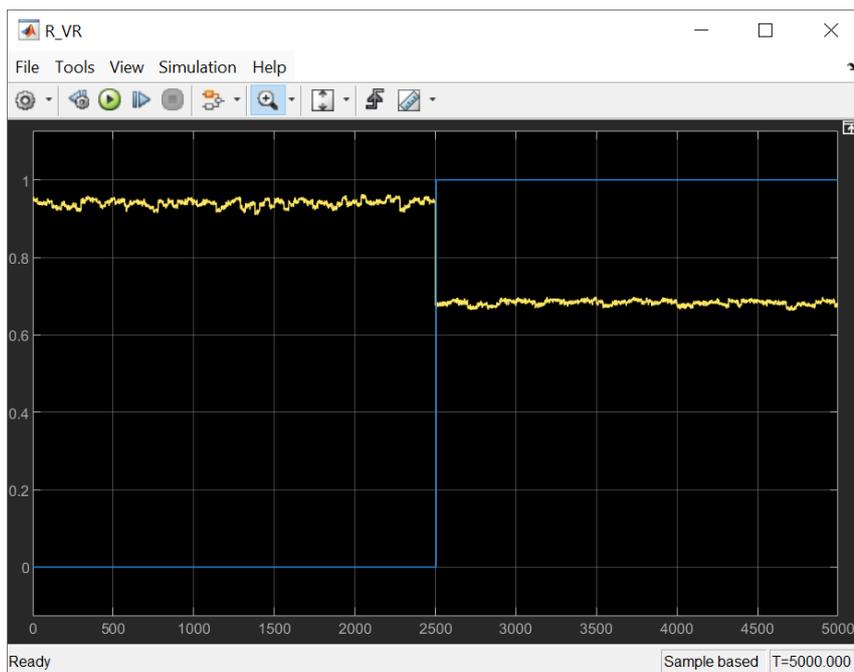


Рис. 4. Графік загального показника відмовостійкості (сценарій з перегрівом компонентів системи)

ВИСНОВКИ З ДАНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ І ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ РОЗВІДОК У ДАНОМУ НАПРЯМІ

Узагальнюючи проведені дослідження, можна стверджувати, що розроблена модель відмовостійкого функціонування систем віртуальної реальності є інструментом, який дозволяє детально аналізувати взаємодію між її компонентами та враховувати вплив динамічно змінюваних зовнішніх факторів. Важливим є те, що ця модель сприяє формуванню цілісного уявлення про структуру системи та механізми, які впливають на її стабільність і ефективність. Це створює основу для розробки більш надійних та адаптивних VR-систем, здатних функціонувати навіть за умов значних змін у зовнішньому середовищі.

Подальше вдосконалення цієї моделі потребує введення функцій, які дозволять кількісно оцінити вплив кожного фактора на окремі компоненти системи. Такі функції мають забезпечувати отримання числових значень, що можуть бути використані для прийняття обґрунтованих рішень стосовно вибору методів мінімізації негативних впливів. Визначення набору функцій, які повертають булеві значення або нормалізовані безрозмірні оцінки в діапазоні від 0 до 1, є необхідним для інтеграції цих даних у системи підтримки прийняття рішень [33]. Такий підхід дозволяє забезпечити автоматизований аналіз та вибір оптимальних стратегій для підвищення відмовостійкості системи.

Використання систем підтримки прийняття рішень є важливим компонентом цього процесу. Завдяки здатності обробляти великі обсяги даних та враховувати численні критерії, ці системи сприяють ефективнішому управлінню складними VR-системами. Розробка таких систем дозволяє формувати рекомендації щодо оптимальних рішень, враховуючи характеристики середовища функціонування та технічні особливості компонентів системи. Це створює передумови для побудови гнучких, адаптивних та високопродуктивних систем [33].

Крім того, важливим є застосування методів нечіткої логіки, які забезпечують врахування невизначеності та неточності вхідних даних. Такий підхід є особливо актуальним для реальних умов експлуатації систем віртуальної реальності, де характеристики середовища та поведінка користувачів можуть бути непередбачуваними. Нечітка логіка дозволяє моделювати складні залежності між факторами та компонентами системи, забезпечуючи більш точний аналіз і підвищуючи ефективність управління. Це сприяє розробці адаптивних механізмів, здатних враховувати змінні умови та автоматично коригувати функціонування системи [34].

Ключовим аспектом забезпечення надійного функціонування VR-систем є їхній захист від кіберзагроз, що включає як превентивні, так і реактивні заходи. Вразливості в архітектурі VR можуть використовуватися зловмисниками для викрадення особистих даних, створення підроблених віртуальних середовищ або навіть маніпулювання поведінкою користувачів. Застосування сучасних методів криптографії, багаторівневої автентифікації та технологій блокчейн може значно підвищити рівень безпеки VR-середовищ. Крім того, необхідно впроваджувати системи моніторингу та виявлення аномалій у реальному часі, що дозволить оперативно реагувати на потенційні загрози та запобігати атакам до того, як вони завдадуть значної шкоди. Таким чином, підхід до захисту VR-систем повинен бути комплексним, включаючи технічні,

організаційні та правові заходи, що забезпечать стійкість цих технологій у динамічному кіберпросторі [35]-[37].

Подальше підвищення ефективності VR-систем може бути досягнуте за рахунок використання методів штучного інтелекту, таких як генетичні алгоритми, парадигми програмування на основі машинного навчання та SVM-класифікація. Генетичні алгоритми дозволяють оптимізувати конфігурацію VR-систем, знаходячи найкращі параметри для підвищення продуктивності та адаптації до змінних умов роботи. Використання методів машинного навчання сприяє вдосконаленню взаємодії користувача з системою, покращенню інтерфейсів та автоматичному підлаштуванню параметрів середовища відповідно до індивідуальних потреб. SVM-класифікація, у свою чергу, може бути ефективним інструментом для аналізу великих обсягів даних, отриманих під час роботи VR-систем, що дозволяє швидко виявляти аномалії та покращувати стабільність функціонування. Інтеграція цих методів у VR-системи створює можливості для їхньої адаптивності, автоматизованого навчання та підвищення загальної ефективності роботи [38]-[40].

Таким чином, інтеграція розробленої моделі з системами підтримки прийняття рішень і методами нечіткої логіки відкриває широкі можливості для підвищення надійності, продуктивності та ефективності VR-систем. Це дозволяє створювати високотехнологічні рішення, які не лише задовольняють сучасні вимоги до відмовостійкості, але й здатні адаптуватися до майбутніх викликів.

Література

1. Goroshko A. Quality and Reliability of Technical Systems: Theory and Practice / A. Goroshko, V. Royzman, M. Zembytska // System Analysis of Automatic Balancing (Self-Balancing) Machine Rotors with Liquid Working Bodies on the Example of Drum Type Washing Machines. – 2018. – Volume 2, August. – P. 26–60. – ISBN 978-609-96036-0-5.
2. Kachur A. Methods of improving security and resilience of VR systems' architecture / A. Kachur, S. Lysenko, O. Bodnaruk, P. Gaj // Proceedings of the 5th International Workshop on Intelligent Information Technologies & Systems of Information Security (IIT&IS 2024). – CEUR Workshop Proceedings, Vol-3675. – 2024. – P. 285–304. – Режим доступу : <https://ceur-ws.org/Vol-3675/paper21.pdf>
3. Winckler M. A Formal Description of Multimodal Interaction Techniques for Immersive Virtual Reality Applications / M. Winckler, C. Freitas, P. Palanque // Lecture Notes in Computer Science. – 2005. – Volume 3425. – P. 239–254. – Режим доступу : https://link.springer.com/chapter/10.1007/11555261_17
4. Al-Jundi H. A framework for fidelity evaluation of immersive virtual reality systems / H. Al-Jundi, E. Tanbour // Virtual Reality. – 2022. – Volume 26, Issue 3. – P. 1103–1122. – Режим доступу : <https://link.springer.com/article/10.1007/s10055-021-00618-y>
5. Building Resilience into Real-time Systems [Електронний ресурс] : веб-сайт // University of Luxembourg. – Режим доступу : <https://www.uni.lu/snt-fr/news/building-resilience-into-real-time-systems/>
6. Antonina Kashtalian, Sergii Lysenko, Oleg Savenko, Andrii Nicheporuk, Tomas Sochor, Volodymyr Avsiyevych. Multi-Computer Malware Detection Systems with Metamorphic Functionality // Radioelectronic and Computer Systems, 2024, no. 1(109). <https://doi.org/10.32620/reks.2024.1.13>
7. K. Bobrovnikova, I. Hurman, O. Hovorushchenko, O. Horbatiuk, S. Lysenko. Information Technology for Predicting the Course of Climacteric Syndrome // CEUR Workshop Proceedings, Volume 3373, 2023, Pages 174-184.
8. Antonina Kashtalian, Sergii Lysenko, Bohdan Savenko, Tomas Sochor, Tetiana Kysil. Principle and Method of Deception Systems Synthesizing for Malware and Computer Attacks Detection // Radioelectronic and Computer Systems, 2023, no. 4(108). <https://doi.org/10.32620/reks.2023.4.10>
9. S. Lysenko, K. Bobrovnikova, B. Savenko, P. Gaj, O. Savenko. Botnet Detection Approach Based on DNS // CEUR Workshop Proceedings, Volume 3156, 2022, Pages 400-410.
10. K. Bobrovnikova, O. Savenko, S. Lysenko, I. Hurman. IoT Cyberattack Detection Approach Based on Energy Consumption Analysis // Proceedings of the 2022 IEEE 12th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies (DESSERT 2022).
11. K. Bobrovnikova, S. Lysenko, I. Hurman, A. Kwiecień. Machine Learning Based Techniques for Cyberattacks Detection in the Internet of Things Infrastructure // CEUR Workshop Proceedings, Volume 3156, 2022.
12. T. Hovorushchenko, O. Savenko, P. Popov, S. Lysenko. IntelITSIS 2021 Intelligent Information Technologies & Systems of Information Security 2021 (Editorial) // CEUR Workshop Proceedings, Volume 2853, 2021.
13. Rohloff, A., Allen, Z., Lin, J. (2021). Virtual Reality Architecture and Immersive Learning Environments. *Computers & Education*, 169, 104211. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2021.104211>
14. Kim, J., Park, M., & Lee, H. (2020). A Study on Virtual Reality Frameworks for Architectural Visualization. *Automation in Construction*, 113, 103144. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103144>
15. Greenwald, S., Kulkarni, A., & Tasse, F. P. (2018). The Role of Virtual Reality in Architectural Design and Simulation. *Journal of Building Performance*, 7(2), 65-80. <https://doi.org/10.1007/s10055-018-00347>

16. Anderson, E., & Peters, J. (2019). Advances in VR-Based Architectural Rendering Techniques. *International Journal of Architectural Computing*, 17(3), 455-472. <https://doi.org/10.1177/1478077119882162>
17. Sampaio, A. Z., & Martins, O. P. (2014). The Application of Virtual Reality Technology in the Construction of Bridges: The Cantilever and Incremental Launching Methods. *Automation in Construction*, 37, 58-67. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2013.10.015>
18. Portman, M., Natapov, A., & Fisher-Gewirtzman, D. (2015). To Go Where No Man Has Gone Before: Virtual Reality in Architecture, Landscape Architecture, and Environmental Planning. *Computers, Environment and Urban Systems*, 54, 376-384. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2015.05.001>
19. Dvorak, J., Hamata, V., Skacilik, J., & Benes, B. (2005). Boosting Up Architectural Design Education with Virtual Reality. *Central European Multimedia and Virtual Reality Conference*, 119-123. https://www.researchgate.net/publication/354036748_TECHNOLOGIES_OF_VIRTUAL_REALITY_IN_THE_CONTEXT_OF_INNOVATION_IN_ARCHITECTURAL_EDUCATION
20. Al-Jundi, H., & Tanbour, E. (2022). A Framework for Fidelity Evaluation of Immersive Virtual Reality Systems. *Virtual Reality*, 26(3), 1103-1122. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10055-021-00618-y>
21. Bohil, I., Alicea, B., & Biocca, F. (2011). Virtual Reality in Neuroscience Research and Therapy. *Nature Reviews Neuroscience*, 12(12), 752-762. <https://doi.org/10.1038/nrn3122>
22. Jerald, J. (2015). The VR Book: Human-Centered Design for Virtual Reality. *ACM Books*, 3, 1-500. <https://doi.org/10.1145/2792790>
23. LaValle, S. M. (2017). Virtual Reality. *Cambridge University Press*, 1st edition. <https://doi.org/10.1017/9781316831816>
24. Sherman, W. R., & Craig, A. B. (2018). Understanding Virtual Reality: Interface, Application, and Design. *Morgan Kaufmann*, 2nd edition. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-800965-9.00001-7>
25. Skarbez, R., Brooks, F. P., & Whitton, M. C. (2017). A Survey of Presence and Related Concepts in Virtual Reality. *ACM Computing Surveys*, 50(6), 1-39. <https://doi.org/10.1145/3134301>
26. Slater, M., & Sanchez-Vives, M. V. (2016). Enhancing Our Lives with Immersive Virtual Reality. *Frontiers in Robotics and AI*, 3, 74. <https://doi.org/10.3389/frobt.2016.00074>
27. Steuer, J. (1992). Defining Virtual Reality: Dimensions Determining Telepresence. *Journal of Communication*, 42(4), 73-93. <https://doi.org/10.1111/j.1460-2466.1992.tb00812.x>
28. Zeltzer, D. (1992). Autonomy, Interaction, and Presence. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 1(1), 127-132. <https://doi.org/10.1162/pres.1992.1.1.127>
29. Vinayagamorthy, V., Gillies, M., Steed, A., & Pan, X. (2021). Building Better VR: Understanding the Principles of Virtual Reality Systems. *ACM Transactions on Graphics*, 40(4), 1-15. <https://doi.org/10.1145/3450626>
30. Bowman, D. A., Kruijff, E., LaViola, J. J., & Poupyrev, I. (2004). 3D User Interfaces: Theory and Practice. *Addison-Wesley Professional*, 1st edition. <https://doi.org/10.5555/993540>
31. Loomis, J. M., & Blascovich, J. J. (1999). Immersive Virtual Environment Technology as a Basic Research Tool in Psychology. *Behavior Research Methods, Instruments, & Computers*, 31(4), 557-564. <https://doi.org/10.3758/BF03200735>
32. Biocca, F., & Levy, M. R. (2013). Communication in the Age of Virtual Reality. *Lawrence Erlbaum Associates*, 1st edition. <https://doi.org/10.4324/9781410604803>
33. Інтелектуальні системи підтримки прийняття рішень / [В. О. Краєвський, О. В. Краєвська, В. В. Краєвський та ін.]; за ред. В. О. Краєвського. – Київ: НАУ, 2019. – 256 с.
34. Гризун Л. Є. Напрями застосування апарата нечіткої логіки для підвищення ефективності управління освітнім процесом / Л. Є. Гризун // Народна освіта. – 2020. – Вип. 1 (45). – С. 1–7.
35. Лисенко С.М. Метод та програмне забезпечення виявлення шкідливих запитів в комп'ютерних мережах на основі протоколу DNS. / С.М. Лисенко, В.О. Лісовий // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2019. – № 3 (273). – С. 173–179.
36. Лисенко С.М. Проектування та розроблення інтелектуального агента виявлення кіберзагроз в корпоративних мережах / С. М. Лисенко, Т.М. Кисіль, Р.В. Щука // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2020. – №5 (289). – С. 89–94. <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2020-289-5-89-94>
37. Лисенко С.М. Метод виявлення кіберзагроз та ШПЗ для забезпечення живучості комп'ютерних систем в корпоративних мережах на основі самоадаптивності / С. М. Лисенко, Т.М. Кисіль, Ю.О. Нічепорук, А.В. Горошко // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2020. – №4 (287). – С. 39–43. <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2020-287-4-39-43>
38. Лисенко С.М. Метод оптимізації планування проектів та формування команд з використанням генетичного алгоритму / С. Лисенко, А. Мандрик // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2024. – №2. – С. 33–41. <https://doi.org/10.31891/2219-9365-2024-78-4>
39. Кривий В.М. Порівняльний аналіз парадигм програмування при розробці програмних систем на основі штучного інтелекту / Кривий В.М., Яшина О.М., Радельчук Г.І., Лисенко С.М. // Вимірювальна та

обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2021. – №1. – С. 62–65. <https://doi.org/10.31891/2219-9365-2021-67-1-9>

40. S. Lysenko. Method for creating SVM classifier for data analysis on FPGA / S. Lysenko, Y. Shpuliar // Computer Systems and Information Technologies. – 2024. – №2. – P. 75–81.

References

1. Goroshko A. Quality and Reliability of Technical Systems: Theory and Practice / A. Goroshko, V. Royzman, M. Zembytska // System Analysis of Automatic Balancing (Self-Balancing) Machine Rotors with Liquid Working Bodies on the Example of Drum Type Washing Machines. – 2018. – Volume 2, August. – P. 26–60. – ISBN 978-609-96036-0-5
2. Kachur A. Methods of improving security and resilience of VR systems architecture / A. Kachur, S. Lysenko, O. Bodnaruk, P. Gaj // Proceedings of the 5th International Workshop on Intelligent Information Technologies & Systems of Information Security (IIT&IS 2024). – CEUR Workshop Proceedings, Vol-3675. – 2024. – P. 285–304. – Rezhym dostupu : <https://ceur-ws.org/Vol-3675/paper21.pdf>
3. Winckler M. A Formal Description of Multimodal Interaction Techniques for Immersive Virtual Reality Applications / M. Winckler, C. Freitas, P. Palanque // Lecture Notes in Computer Science. – 2005. – Volume 3425. – P. 239–254. – Rezhym dostupu : https://link.springer.com/chapter/10.1007/11555261_17
4. Al-Jundi H. A framework for fidelity evaluation of immersive virtual reality systems / H. Al-Jundi, E. Tanbour // Virtual Reality. – 2022. – Volume 26, Issue 3. – P. 1103–1122. – Rezhym dostupu : <https://link.springer.com/article/10.1007/s10055-021-00618-y>
5. Building Resilience into Real-time Systems [Elektronnyi resurs] : veb-sait // University of Luxembourg. – Rezhym dostupu : <https://www.uni.lu/snt-fr/news/building-resilience-into-real-time-systems/>
6. Antonina Kashtalian, Sergii Lysenko, Oleg Savenko, Andrii Nicheporuk, Tomas Sochor, Volodymyr Avsiyevych. Multi-Computer Malware Detection Systems with Metamorphic Functionality // Radioelectronic and Computer Systems, 2024, no. 1(109). <https://doi.org/10.32620/reks.2024.1.13>
7. K. Bobrovnikova, I. Hurman, O. Hovorushchenko, O. Horbatiuk, S. Lysenko. Information Technology for Predicting the Course of Climacteric Syndrome // CEUR Workshop Proceedings, Volume 3373, 2023, Pages 174-184.
8. Antonina Kashtalian, Sergii Lysenko, Bohdan Savenko, Tomas Sochor, Tetiana Kysil. Principle and Method of Deception Systems Synthesizing for Malware and Computer Attacks Detection // Radioelectronic and Computer Systems, 2023, no. 4(108). <https://doi.org/10.32620/reks.2023.4.10>
9. S. Lysenko, K. Bobrovnikova, B. Savenko, P. Gaj, O. Savenko. Botnet Detection Approach Based on DNS // CEUR Workshop Proceedings, Volume 3156, 2022, Pages 400-410.
10. K. Bobrovnikova, O. Savenko, S. Lysenko, I. Hurman. IoT Cyberattack Detection Approach Based on Energy Consumption Analysis // Proceedings of the 2022 IEEE 12th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies (DESSERT 2022).
11. K. Bobrovnikova, S. Lysenko, I. Hurman, A. Kwiecień. Machine Learning Based Techniques for Cyberattacks Detection in the Internet of Things Infrastructure // CEUR Workshop Proceedings, Volume 3156, 2022.
12. T. Hovorushchenko, O. Savenko, P. Popov, S. Lysenko. IntelITSIS 2021 Intelligent Information Technologies & Systems of Information Security 2021 (Editorial) // CEUR Workshop Proceedings, Volume 2853, 2021.
13. Rohloff, A., Allen, Z., Lin, J. (2021). Virtual Reality Architecture and Immersive Learning Environments. Computers & Education, 169, 104211. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2021.104211>
14. Kim, J., Park, M., & Lee, H. (2020). A Study on Virtual Reality Frameworks for Architectural Visualization. Automation in Construction, 113, 103144. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103144>
15. Greenwald, S., Kulkarni, A., & Tasse, F. P. (2018). The Role of Virtual Reality in Architectural Design and Simulation. Journal of Building Performance, 7(2), 65-80. <https://doi.org/10.1007/s10055-018-00347>
16. Anderson, E., & Peters, J. (2019). Advances in VR-Based Architectural Rendering Techniques. International Journal of Architectural Computing, 17(3), 455-472. <https://doi.org/10.1177/1478077119882162>
17. Sampaio, A. Z., & Martins, O. P. (2014). The Application of Virtual Reality Technology in the Construction of Bridges: The Cantilever and Incremental Launching Methods. Automation in Construction, 37, 58-67. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2013.10.015>
18. Portman, M., Natapov, A., & Fisher-Gewirtzman, D. (2015). To Go Where No Man Has Gone Before: Virtual Reality in Architecture, Landscape Architecture, and Environmental Planning. Computers, Environment and Urban Systems, 54, 376-384. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbysys.2015.05.001>
19. Dvorak, J., Hamata, V., Skacilik, J., & Benes, B. (2005). Boosting Up Architectural Design Education with Virtual Reality. Central European Multimedia and Virtual Reality Conference, 119-123. https://www.researchgate.net/publication/354036748_TECHNOLOGIES_OF_VIRTUAL_REALITY_IN_THE_CONTEXT_OF_INNOVATION_IN_ARCHITECTURAL_EDUCATION
20. Al-Jundi, H., & Tanbour, E. (2022). A Framework for Fidelity Evaluation of Immersive Virtual Reality Systems. Virtual Reality, 26(3), 1103-1122. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10055-021-00618-y>
21. Bohil, I., Alicea, B., & Biocca, F. (2011). Virtual Reality in Neuroscience Research and Therapy. Nature Reviews Neuroscience, 12(12), 752-762. <https://doi.org/10.1038/nrn3122>
22. Jerald, J. (2015). The VR Book: Human-Centered Design for Virtual Reality. ACM Books, 3, 1-500. <https://doi.org/10.1145/2792790>
23. LaValle, S. M. (2017). Virtual Reality. Cambridge University Press, 1st edition. <https://doi.org/10.1017/9781316831816>
24. Sherman, W. R., & Craig, A. B. (2018). Understanding Virtual Reality: Interface, Application, and Design. Morgan Kaufmann, 2nd edition. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-800965-9.00001-7>
25. Skarbez, R., Brooks, F. P., & Whitton, M. C. (2017). A Survey of Presence and Related Concepts in Virtual Reality. ACM Computing Surveys, 50(6), 1-39. <https://doi.org/10.1145/3134301>
26. Slater, M., & Sanchez-Vives, M. V. (2016). Enhancing Our Lives with Immersive Virtual Reality. Frontiers in Robotics and AI, 3, 74. <https://doi.org/10.3389/frobt.2016.00074>
27. Steuer, J. (1992). Defining Virtual Reality: Dimensions Determining Telepresence. Journal of Communication, 42(4), 73-93. <https://doi.org/10.1111/j.1460-2466.1992.tb00812.x>
28. Zeltzer, D. (1992). Autonomy, Interaction, and Presence. Presence: Teleoperators and Virtual Environments, 1(1), 127-132. <https://doi.org/10.1162/pres.1992.1.1.127>
29. Vinayagamoorthy, V., Gillies, M., Steed, A., & Pan, X. (2021). Building Better VR: Understanding the Principles of Virtual Reality Systems. ACM Transactions on Graphics, 40(4), 1-15. <https://doi.org/10.1145/3450626>
30. Bowman, D. A., Kruijff, E., LaViola, J. J., & Poupyrev, I. (2004). 3D User Interfaces: Theory and Practice. Addison-Wesley Professional, 1st edition. <https://doi.org/10.5555/993540>

31. Loomis, J. M., & Blascovich, J. J. (1999). Immersive Virtual Environment Technology as a Basic Research Tool in Psychology. *Behavior Research Methods, Instruments, & Computers*, 31(4), 557-564. <https://doi.org/10.3758/BF03200735>
32. Biocca, F., & Levy, M. R. (2013). *Communication in the Age of Virtual Reality*. Lawrence Erlbaum Associates, 1st edition. <https://doi.org/10.4324/9781410604803>
33. *Інтелектуальні системи підтримки прийняття рішень* / [V. O. Kraievskiy, O. V. Kraievskaya, V. V. Kraievskiy ta in.]; za red. V. O. Kraievskoho. – Kyiv: NAU, 2019. – 256 s.
34. Hryzun L. Ye. Napriamy zastosuvannya aparata nechitkoi lohiky dlia pidvyshchennia efektyvnosti upravlinnia osvitim protsesom / L. Ye. Hryzun // *Narodna osvita*. – 2020. – Vyp. 1 (45). – S. 1–7.
35. Lysenko S.M. Metod ta prohramne zabezpechennia vyivlennia shkidlyvykh zapytiv v kompiuternykh merezhakh na osnovi protokolu DNS. / S.M. Lysenko, V.O. Lisovyi // *Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Tekhnichni nauky*. – 2019. – № 3 (273). – S. 173–179.
36. Lysenko S.M. Proektuvannya ta rozroblennia intelektualnoho ahenta vyivlennia kiberzahroz v korporatyvnykh merezhakh / S. M. Lysenko, T.M. Kysil, R.V. Shchuka // *Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Tekhnichni nauky*. – 2020. – №5 (289). – S. 89–94. <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2020-289-5-89-94>
37. Lysenko S.M. Metod vyivlennia kiberzahroz ta ShPZ dlia zabezpechennia zhyvuchosti kompiuternykh system v korporatyvnykh merezhakh na osnovi samoadaptyvnosti / S. M. Lysenko, T.M. Kysil, Yu.O. Nicheporuk, A.V. Horoshko // *Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Tekhnichni nauky*. – 2020. – №4 (287). – S. 39–43. <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2020-287-4-39-43>
38. Lysenko S.M. Metod optymizatsii planuvannya proektiv ta formuvannya komand z vykorystanniam henetychnoho alhorytmu / S. Lysenko, A. Mandryk // *Vymiriuvalna ta obchysliuvalna tekhnika v tekhnolohichnykh protsesakh*. – 2024. – №2. – S. 33–41. <https://doi.org/10.31891/2219-9365-2024-78-4>
39. Kryvyi V.M. Porivnialnyi analiz paradyhm prohramuvannya pry rozrobtsi prohramnykh system na osnovi shtuchoho intelektu / Kryvyi V.M., Yashyna O.M., Radelchuk H.I., Lysenko S.M. // *Vymiriuvalna ta obchysliuvalna tekhnika v tekhnolohichnykh protsesakh*. – 2021. – №1. – S. 62–65. <https://doi.org/10.31891/2219-9365-2021-67-1-9>
40. S. Lysenko. Method for creating SVM classifier for data analysis on FPGA / S. Lysenko, Y. Shpuliar // *Computer Systems and Information Technologies*. – 2024. – №2. – P. 75–81.