

<https://doi.org/10.31891/2219-9365-2024-77-39>

УДК 005.21:005.8:004.8.

ЛИСЕНКО Сергій

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

КАЧУР Артем

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

## ТЕХНОЛОГІЯ ВІРТУАЛЬНОЇ РЕАЛЬНОСТІ: ОПТИМІЗАЦІЯ АРХІТЕКТУРИ СИСТЕМ ВІРТУАЛЬНОЇ РЕАЛЬНОСТІ

*В роботі досліджено виклики, що виникають при розробці та застосуванні технологій віртуальної реальності (VR). Незважаючи на революційний потенціал VR у різних галузях, його повноцінній реалізації перешкоджають технічні, фінансові та етичні бар'єри. Існують технічні проблеми, пов'язані з розробкою високоякісного апаратного та програмного забезпечення, безперешкодною інтеграцією з існуючою інфраструктурою та потребою в значних обчислювальних ресурсах. Фінансові обмеження виникають через високу вартість виробництва та обслуговування, що обмежує доступність. З етичної точки зору, занурення у віртуальну реальність створює потенціал для звикання, антисоціальної поведінки та порушення конфіденційності даних. У статті також обговорюються компромісні рішення, складність, технологічні обмеження, спільна оптимізація апаратного та програмного забезпечення, перспективність, тестування та валідація, пов'язані з розробкою віртуальної реальності. Крім того, представлено огляд рішень цих задач, запропонованих у сучасній науковій літературі. Стаття підкреслює необхідність подальших досліджень, інновацій та вдосконалення для подолання цих перешкод і розкриття трансформаційного потенціалу технології віртуальної реальності.*

*Ключові слова: віртуальна реальність, технологічні виклики, компромісні рішення, рішення для VR, оптимізація віртуальної реальності, спільна оптимізація, економічна ефективність.*

LYSENKO Sergii, KACHUR Artem

Khmelnitskyi National University

## VR TECHNOLOGY: OPTIMIZATION OF VR SYSTEM ARCHITECTURE

*This paper explores the challenges faced in the development and application of virtual reality (VR) technologies. Despite the revolutionary potential of VR in various industries, its full realization is hampered by technical, financial, and ethical barriers. There are technical challenges related to the development of high-quality hardware and software, seamless integration with existing infrastructure, and the need for significant computing resources. Financial constraints arise from the high cost of production and maintenance, which limits accessibility. From an ethical perspective, immersive virtual reality creates the potential for addiction, anti-social behavior, and data privacy violations. The article also discusses the trade-offs, complexity, technological limitations, joint optimization of hardware and software, future proofing, testing, and validation associated with virtual reality development. In addition, an overview of solutions to these problems proposed in the current scientific literature is presented. VR has already made significant strides in revolutionizing industries such as gaming, education, healthcare, and architecture. To overcome the technical hurdles, continued investment in research and development is crucial, with an emphasis on creating more efficient and affordable hardware and software solutions. Additionally, collaboration across industries and experts is essential for seamless integration into existing infrastructure and addressing the need for substantial computing resources. On the financial front, innovative business models and funding strategies can help make VR more accessible to a broader audience. Ethical concerns should be met with proactive measures, including the development of responsible use guidelines and robust data protection mechanisms.*

*Keywords: virtual reality, technological challenges, trade-off solutions, VR solutions, virtual reality optimization, co-optimization, cost-effectiveness.*

### Постановка проблеми у загальному вигляді

#### та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Розвиток цифрової ери спричинив хвилю трансформаційних технологій, серед яких посідає суттєве місце віртуальна реальність (VR). Віртуальна реальність, яка об'єднує фізичний і цифровий світи, робить успіхи в таких галузях, як освіта, охорона здоров'я, розваги та навчання, обіцяючи змінити те, як ми вчимося, лікуємося, граємо і працюємо [1]. Однак реалізація повного потенціалу технології пов'язана з проблемами, що охоплюють технічну, фінансову та етичну сфери.

З технічної точки зору, розробка апаратного та програмного забезпечення для першокласного VR-досвіду створює перешкоди, включаючи час автономної роботи, комфорт, точність відстеження та вимоги до обробки [2-5]. Безперешкодна інтеграція з існуючими системами та навантаження на ІТ-ресурси є додатковими проблемами [6-7]. З фінансової точки зору, високі виробничі витрати призводять до зростання вартості кінцевих продуктів, тоді як постійне технічне обслуговування і швидкий розвиток технологій додають проблем [8-9]. Етичні дилеми виникають через потенційну залежність, антисоціальну поведінку та конфіденційність даних [10-13].

Поширення технологій віртуальної реальності створює необхідність вирішення цих задач. Подолання апаратних і програмних задач, вирішення питань економічної ефективності та врахування

етичних аспектів є важливими для розкриття трансформаційного потенціалу віртуальної реальності [1]. Цей шлях вимагає постійних інновацій та вдосконалення, оскільки ми працюємо над тим, щоб використати можливості технології віртуальної реальності.

Основна мета та завдання цієї статті – розглянути та підкреслити нагальну потребу в комплексному підході до оптимізації взаємодії апаратного та програмного забезпечення систем VR. Спираючись на вичерпну літературу, автори прагнуть підкреслити важливість збалансованої стратегії оптимізації, яка охоплює затримку, енергоспоживання, стабільність апаратного забезпечення, користувацький досвід, портативність та ефективність розробки. Цим дослідженням ми прагнемо підкреслити необхідність міждисциплінарної співпраці, яка об'єднує комп'ютерну архітектуру, взаємодію людини з комп'ютером, програмну інженерію та когнітивну науку, що, зрештою, сприятиме трансформаційному прогресу для ширшого впровадження та еволюції систем віртуальної реальності.

## 2 Ключові аспекти оптимізації архітектури систем віртуальної реальності

Оптимізація апаратного забезпечення VR – це процес вдосконалення компонентів системи віртуальної реальності для підвищення продуктивності, ефективності та якості роботи користувачів. Це передбачає комплексну стратегію, яка налаштовує та адаптує апаратні можливості відповідно до високих вимог додатків віртуальної реальності, забезпечуючи при цьому безперебійний досвід для користувачів. У цій статті ми розглянемо складне завдання оптимізації апаратного забезпечення VR, проаналізуємо його виклики та потенційні рішення.

Оптимізація архітектури віртуальної реальності (VR) має на меті покращити такі ключові характеристики, як продуктивність, енергоефективність та економічність. Вона включає в себе різні методології, від алгоритмічного дизайну до оцінки системи, але залишається складною через багатоцільові виклики. Покращення одного аспекту може вплинути на інші, що посилюється динамічною природою додатків віртуальної реальності та взаємодією між апаратним і програмним забезпеченням. Ця сфера вимагає міждисциплінарних досліджень, що поєднують комп'ютерні науки, інженерію та людинно-машинну взаємодію для подолання перешкод оптимізації.

1. **Компромісні рішення:** Оптимізація апаратного забезпечення передбачає збалансування таких цілей, як потужність, ефективність, використання пам'яті, вартість і надійність. Управління цими компромісами залежить від застосування, бюджету та обмежень. Такі методи, як DVFS (динамічне масштабування напруги і частоти) і фреймворки на основі машинного навчання [14]-[15], оптимізують компроміси між потужністю і продуктивністю.

2. **Складність:** оптимізація апаратного забезпечення враховує взаємозалежності компонентів. Такі технології, як SSCN (розріджена згорткова мережа підмножин) для VR, AR та автономного водіння кидають виклик існуючим прискорювачам. Прискорювач на основі ПЛІС, що використовує такі стратегії, як видалення нулів [16], вирішує проблеми нерегулярних операцій SSCN.

3. **Технологічні обмеження:** Транзистори, що зменшуються, створюють такі проблеми, як втрати сигналу, питома потужність та перегрів. НСІ (інжекція носіїв заряду) і самонагрівання впливають на логічні схеми і мікроскопічні польові транзистори [17]-[18].

4. **Апаратно-програмна оптимізація:** Оптимізація продуктивності передбачає збалансування взаємодії апаратного та програмного забезпечення. Апаратне забезпечення повинно ефективно виконувати інструкції програмного забезпечення, а програмне забезпечення повинно використовувати можливості апаратного забезпечення [19].

5. **Перспектива:** Передбачити майбутні потреби, збалансувавши специфіку та загальність, є складним завданням. Відновлення технічних засобів продовжує термін служби електроніки [20].

6. **Тестування та валідація:** Ретельне тестування і методи програмно-апаратного моделювання (HIL) [21]-[22] забезпечують правильне функціонування.

7. **Економічна ефективність:** Оптимізація апаратного забезпечення повинна порівнювати переваги з виробничими витратами [23]. Генетичні алгоритми оптимізують зниження витрат у розподільчих мережах.

У світлі складності та багатогранності задач, описаних в оптимізації апаратного забезпечення VR, стає очевидним, що цілісний і міждисциплінарний підхід має вирішальне значення. Складна взаємодія між апаратним і програмним забезпеченням у поєднанні з притаманними їй компромісами і технологічними обмеженнями підкреслює величезну складність цієї галузі. Крім того, динамічний характер VR-додатків і нагальна потреба в перспективних рішеннях ще більше підкреслюють критичну природу цієї сфери. Тому існує нагальна потреба в спеціальних наукових дослідженнях, спрямованих на розробку рішень, які б комплексно вирішували ці задачі оптимізації. Такі зусилля не лише підвищать загальну продуктивність і ефективність систем віртуальної реальності, але й забезпечать довговічність, адаптивність і економічну ефективність цих імерсивних технологій.

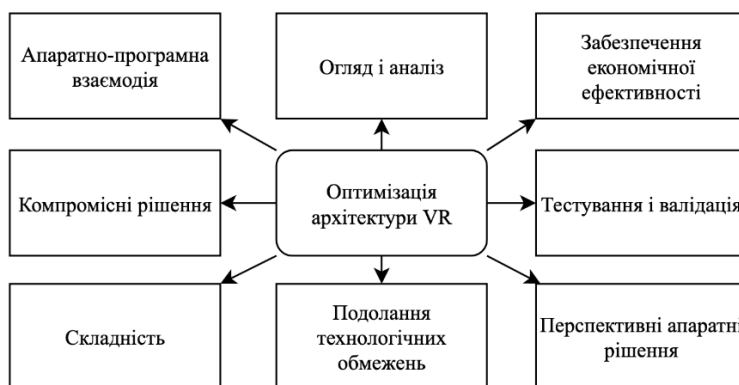


Рис. 1. «Дорожня карта» оптимізації архітектури VR

### 3 Сучасний стан

У даній статті автори приділяють увагу аспекту спільної оптимізації апаратного та програмного забезпечення в архітектурі віртуальної реальності (VR). Цей аспект важливий через зв'язок між апаратною та програмною частинами. Спільна оптимізація дозволяє досягти оптимальної продуктивності системи. Однак збалансувати апаратуру загального призначення та вимоги вузькоспеціалізованих програмних систем може бути складно. Співпраця між розробниками апаратного та програмного забезпечення допомагає вирішувати задачі та оптимізувати систему. Цей підхід має потенціал для створення більш ефективних VR систем.

У статті [19] представлено технологію візуальної інерційної одометрії (VIO) для AR/VR та інших застосувань. Вона використовує оптимізований прискорювач VIO, що покращує продуктивність та зменшує споживання енергії. Цей прискорювач дозволяє отримати високу якість VIO та знизити споживання енергії.

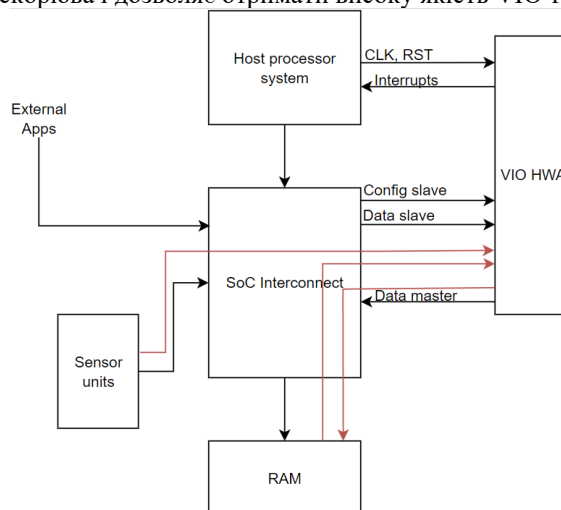


Рис. 2. Інтеграція VIO на вбудованій системі на кристалі [19]

Стаття [36] демонструє розподілену архітектуру обчислення на сенсорах для AR/VR окулярів. Вона пропонує оптимізацію зниження споживання енергії та покращення затримки та конфіденційності. Однак ця стаття обмежується лише споживанням енергії.

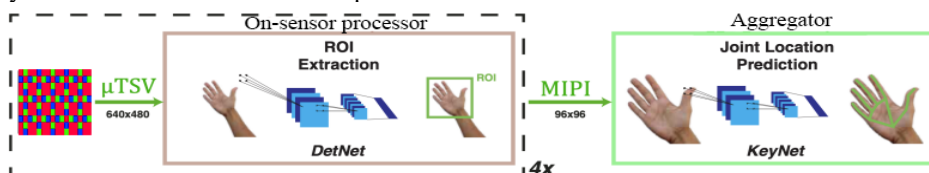


Рис. 3. Приклад оптимального розподілу робочого навантаження під час відслідковування руху рук на архітектурі розподілених обчислень на сенсорах [36]

У дослідженні [37] автори представляють прототип мобільної системи на кристалі (SoC), спеціально розробленої для енергоефективного відслідковування погляду з використанням моделі Codec Avatar. Створена за технологією 7 нм, тестовий чіп включає акселератор нейронної мережі, масив MAC на 1024 елемента, 2 МБ SRAM на чіпі та 32-бітний RISC-V CPU. Цей тестовий чіп вбудовується в мобільну VR-

гарнітуру для запуску додатку Codec Avatar, демонструючи процес розробки, який охоплює інтеграцію на рівні системи, налаштування моделі та прискорення на рівні схеми для вимог кращих мобільних AR/VR SoC. Завдяки оптимізації моделі та прискоренню на рівні схеми, прототип SoC досягає 30 кадрів на секунду з низьким споживанням енергії та компактним форм-фактором. Тестовий чіп споживає 22,7 мВт потужності, обробляючи весь модель CNN за 16,5 мс, що призводить до енергоефективного результату 375 мДж/кадр/око в межах 2,56 мм<sup>2</sup> площі кремнію. Функціональна схема представлена на рис. 4.

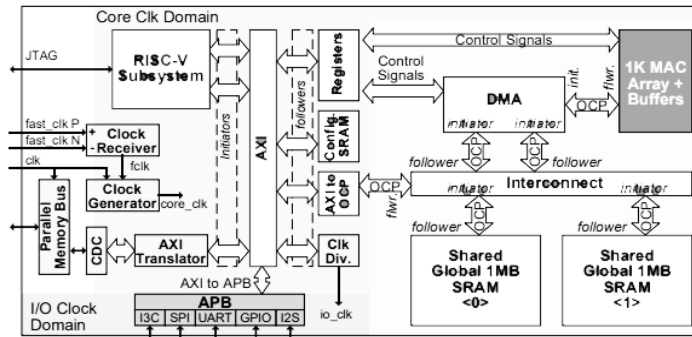


Рис. 4. Тестова мікросхема прискорювача DNN: функціональна схема [37]

Незважаючи на суттєві досягнення, продемонстровані у [37], воно в основному зосереджене на споживанні енергії, ігноруючи інші можливі виклики, що можна відзначити як його основний недолік.

У статті [38] розроблено доступну VR-платформу під назвою Dune, яка підвищує взаємодію та інтегрується з популярними САПР. Архітектура програмного забезпечення Dune представлена на рис. 5. Цей проект вимагає високопродуктивних пристроїв для роботи зі складністю, а також зосереджується на вартісних рішеннях для промислового використання. Унікальною особливістю є точне відстеження рухів, досягнуте за допомогою комбінації глибинної камери та WiiRemote. У розглянутій роботі розробка VR-платформи Dune зосереджується на покращенні взаємодії та сумісності з відомими САПР. Незважаючи на досягнення ініціативи, особливо в плані відстеження рухів, очевидно, що стаття в основному зосереджена на зручності використання для кінцевих користувачів та зручності розробки. Ця обмежена спрямованість може ігнорувати інші важливі аспекти проектування та оптимізації системи віртуальної реальності. Отже, однією з основних обмежень цієї статті є її обмежена увага лише до цих двох факторів.

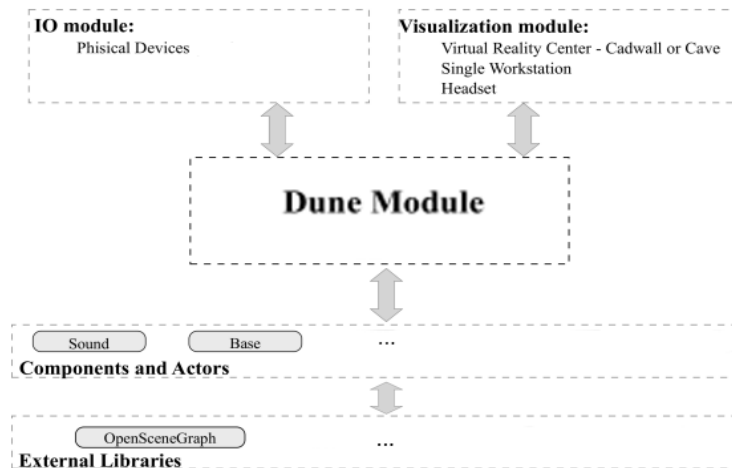


Рис. 5. Архітектура ПЗ Dune [38]

У статті [39] представлено систему EVR: комплексну систему для енергоефективної обробки VR-відео. EVR спрямована на головне затримування продуктивності VR - проекційну трансформацію (PT) – і використовує дві основні стратегії оптимізації. Семантично-орієнтоване потокове відтворення (SAS) в хмарі зменшує виконання PT на пристроях VR шляхом попереднього рендерингу 360° кадрів, використовуючи невикористану семантичну інформацію. Апаратно-прискорене відтворення (HAR) на клієнтських пристроях додатково зменшує споживання енергії завдяки спеціалізованому апаратному прискоренню PT. Прототип EVR, розміщений на платформі Amazon AWS та на платі NVIDIA Jetson TX2 з FPGA Xilinx Zynq-7000, досягає значних результатів. EVR скорочує використання енергії при рендерингу VR до 58%, що виражається в потенційній 42% економії енергії для пристроїв VR. Розширена апаратна архітектура представлена на рис. 6.

Дослідження, представлене в статті [39], пропонує інноваційний підхід до обробки VR-відео, зосереджуючись виключно на споживанні енергії через систему EVR. Незважаючи на досягнення значних енергозбережень, виключне спрямування на споживання енергії може бути розглянуто як його основне обмеження, можливо, ігноруючи інші важливі виклики оптимізації VR.

Дослідження [40] спрямоване на створення енергоефективного рішення для існуючого алгоритму оцінки позиції рук, що використовує глибинну камеру. Автори використовують стиснення глибокої нейронної мережі за допомогою технік динамічної квантизації на різних рівнях, досягаючи значного стиснення при збереженні точності. Розроблена спеціалізована апаратна архітектура. Автори вибрали ПЛІС як платформу через її енергоефективність та переносимість. Рішення, реалізоване на FPGA Xilinx UltraScale+ MPSoC, перевершує оригінальну реалізацію на NVIDIA GeForce GTX 1070, в 4,2 рази по швидкості і 577,3 рази по енергоефективності. Процес розробки представлений на рис. 7.

Дослідження [40] презентує суттєві досягнення в енергоефективності та продуктивності для алгоритмів оцінки позиції рук за допомогою технік динамічної квантизації та апаратної архітектури на основі FPGA. Проте його основне обмеження полягає в відсутності урахування стабільності апаратного забезпечення та зручності розробки, що може обмежити його загальну застосовність і впровадження в різних сценаріях.

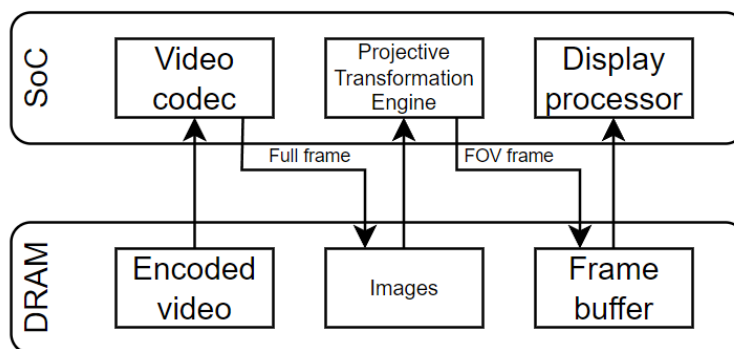


Рис. 6. Розширена апаратна архітектура [39]

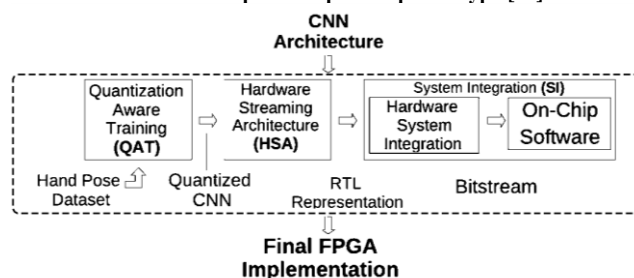


Рис. 7. Огляд процесу розробки [40]

Новий співпроцесор, завдяки своєму високопродуктивному та енергоефективному дизайну, відповідає вимогам вимогливих обчислювальних завдань і сприяє впровадженню гетерогенних систем для високопродуктивних обчислень. Проте, зі зростанням масштабу системи і інтеграцією нових співпроцесорів програмування таких систем стає складним завданням. Для вирішення цього питання у статті [41] пропонується абстрактний підхід до покращення паралельної програмуваності. Вона вводить структуровану систему прототипу паралельного програмування, здатну використовувати різні рівні неявного паралелізму. Структура спільної мережі програмування представлена на рис. 8.

У статті [41] пропонується підхід до вирішення задачі програмування в високопродуктивних гетерогенних системах. Однак цей підхід зосереджується переважно на полегшенні розробки через структуроване паралельне програмування і, здається, не звертає належної уваги на аспекти, такі як затримка, споживана потужність та стабільність апаратного забезпечення. Ця вибіркова увага може бути його основним обмеженням, що, можливо, залишає без уваги кілька критичних аспектів оптимізації системи.

Стаття [42] вирішує задачі досягнення високої якості в додатках віртуальної реальності (VR) з використанням потокового відео 360° через високі вимоги до затримки і пропускної спроможності мережі. У статті пропонується рішення, яке використовує потокове відео 360° з плитками та потужності кешування обчислювальних ресурсів на мобільних кордонних обчисленнях (МЕС) для передбачення поля зору (FoV) в гарнітурі та доставки необхідних плиток. За допомогою кешування з передбаченням плиток в МЕС можливо заощадити пропускну спроможність і підтримувати кілька користувачів. Автори визначають модель для вибору плиток, кешування та покриття FoV і пропонують евристичний алгоритм для її вирішення (рис. 9).

Порівняння з існуючими політиками кешування, такими як «Останній використаний» (LRU) та «Найрідше використаний» (LFU), показує, що запропонований підхід покращує покриття FoV на 30% і зменшує витрати на кешування на 25%.

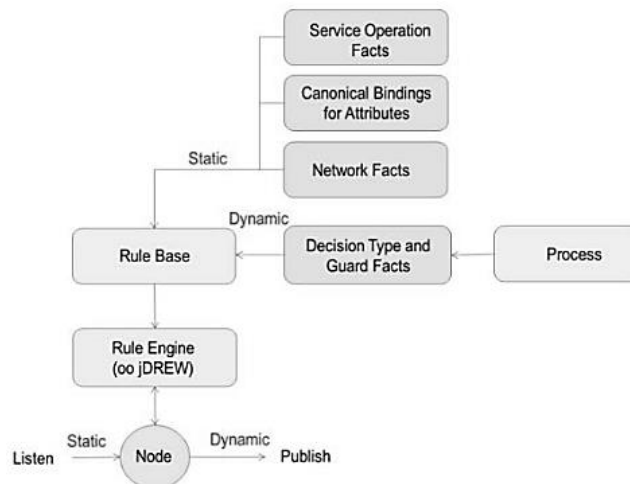


Рис. 8. Загальна структура колабораційної мережі програмування [41]

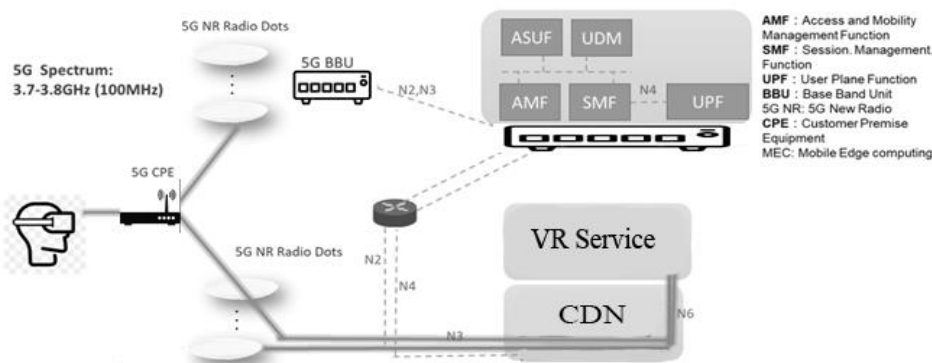


Рис. 9. Мережа 5G та мобільні кордонні обчислення [42]

Дослідження, яке описано в [42], ефективно вирішує задачі затримки та зручності використання кінцевими користувачами в застосунках VR з потоковим відео 360°. Проте важливо зауважити, що його фокус залишається обмеженим цими аспектами. Критичні аспекти, такі як споживана потужність, стабільність апаратного забезпечення та інші важливі питання, залишаються поза увагою. Цей вибірковий підхід є основним обмеженням статті і вказує на потребу подальшого дослідження та розробки комплексного рішення.

Стаття, позначена як [43], пропонує дослідження з метою підвищення ефективності доступу до інформації та інтерактивного досвіду в системі віртуальної реальності (VR), зниження когнітивного навантаження користувачів та оптимізації ефективності розробників у створенні VR системи. Було запропоновано метод, названий оптимізацією ресурсів сценарію завдань на основі методу функціонального розгортання і згорткових нейронних мереж (QFD-CNN). Цей метод аналізує характеристики багатоканальних інформаційних ресурсів у системі VR, будує кореляційну матрицю характеристик ресурсів сценарію системи VR, використовує АНР-QFD і матрицю оцінки для визначення пріоритетів характеристик ресурсів системи VR, проводить експеримент на користувачах з вимірюванням когнітивного навантаження, збирає дані вхідного і вихідного набору CNN і створює систему CNN для передбачення когнітивного навантаження та задоволеності користувачів у взаємодії людина-комп'ютер у системі VR. Потім цей метод був застосований до інтерфейсу інформації завдань системи VR у розумному місті. Результати показують, що модель АНР-QFD, заснована на когнітивному навантаженні, і мережа прогнозування CNN є ефективними, як вказує значення коефіцієнта CR менше 0,1 і середньоквадратична помилка (MSE) 0,004247. Порівняння традиційного процесу проектування і оптимізованого методу, запропонованого в дослідженні, показало, що останній призводить до меншого когнітивного навантаження і кращого досвіду виконання завдань для користувача, що свідчить про те, що оптимізаційний метод може служити посиланням для побудови систем віртуальної реальності. Схема теоретичного каркасу представлена на рис. 10.

Дослідження надає цінні уявлення щодо підвищення ефективності доступу до інформації та інтерактивного досвіду у системі VR, зокрема з фокусом на затримках і зручності використання для кінцевих користувачів та розробки. Однак помітним обмеженням цього дослідження є виключення важливих аспектів, таких як споживана потужність, стабільність апаратного забезпечення та інші суттєві компоненти оптимізації VR систем. Це пропуск вказує на потенційні напрями для подальших комплексних досліджень з метою гolistичного вирішення задач систем віртуальної реальності.

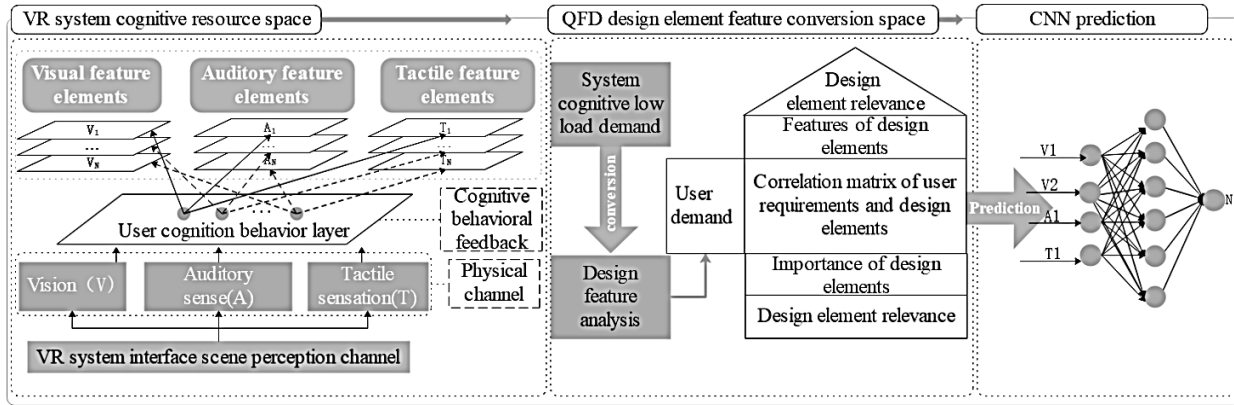


Рис. 10. Теоретичний фреймворк [43]

У статті [44] розглядаються виклики бездротової передачі віртуальної реальності, включаючи передачу контенту великих об'ємів, вимоги до якості обслуговування та обмежену пропускну здатність мобільних мереж. Автори пропонують схему обміну контентом на основі мультимедійного зв'язку 5G пристрій-пристрій (D2D), що дозволяє сусіднім користувачам VR створювати мультимедійні кластери та обмінюватися контентом VR за допомогою режиму D2D, використовуючи ресурси каналу передачі даних звичайних користувачів VR. Пропозиція включає двоетапну схему, яка включає в себе розрахунок оптимальної потужності передачі для кожного пристрою користувача VR на основі геометричної відстані та перетворення розподілу каналу в задачу вирішення біпартитного графу оптимально за допомогою угорського алгоритму. Модель системи мультимедійних кластерів D2D VR представлена на рис. 11. Результати моделювання показують, що запропонована схема, порівняно з евристичними і стохастичними схемами, може збільшити загальну пропускну здатність мережі приблизно на 50% і 12% відповідно, досягаючи значний приріст загальної пропускну здатності та менші затримки передачі. Незважаючи на те, що метод пропонує рішення щодо бездротової передачі VR за допомогою схеми мультимедійного зв'язку 5G пристрій-до-пристрій (D2D), він в основному акцентується на обміні контентом і пропускну здатності мережі. Зокрема, упущені деякі аспекти, такі як стабільність апаратних засобів, портативність та розробка. Це є суттєвим обмеженням, враховуючи комплексні вимоги до всебічної оптимізації VR.

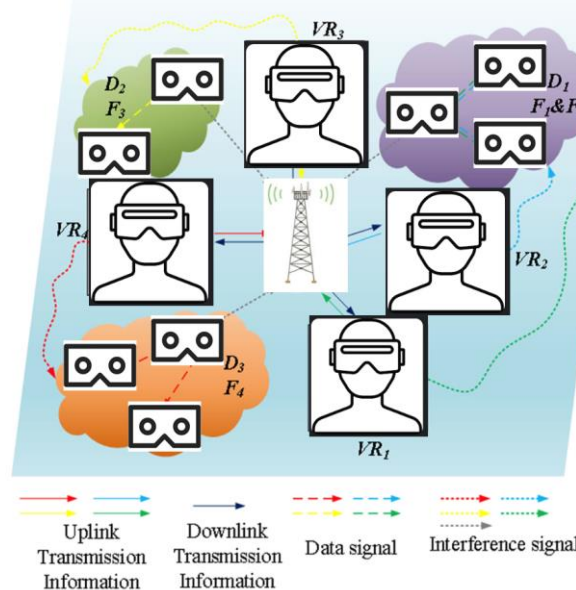


Рис. 11. Модель системи кластерів D2D

#### 4 Переваги та недоліки існуючих рішень

У ході аналізу вибраних статей, присвячених взаємодії апаратного та програмного забезпечення у віртуальній реальності (VR), стала очевидною наявність деяких проблемних питань. Ці виклики, які виникають безпосередньо з вмісту та уявлень у статтях, підкреслюють головні задачі, які дослідники вирішують у галузі VR. Наведене подальше перерахування викликів служить не лише як компактне представлення основних областей дослідження, але й надає можливість розглядати еволюцію досліджень у галузі VR через призму цих ключових викликів. Розуміючи ці основні виклики, можна оцінити акценти та напрямки, який сучасні дослідження вибирають для вирішення складної взаємодії між апаратним та програмним забезпеченням VR. У даному дослідженні представлено таблицю, яка демонструє основні виклики взаємодії апаратного ж та програмного забезпечення VR, а також які задачі вирішує кожна стаття, а саме: (1) Затримка; (2) Споживана потужність; (3) Стабільність апаратури; (4) Зручність для кінцевого користувача; (5) Портативність; (6) Розробка.

Кожне дослідження перелічена разом із задачами, які вона намагається вирішити, з відповідним плюсом, який показує вирішений виклик. Наприклад, стаття [19] фокусується на викликах, пов'язаних із затримкою та споживаною потужністю. Так само, [36] глибше досліджує питання споживання потужності та стабільності апаратури. Щоб краще зрозуміти багатогранну природу взаємодії апаратного та програмного забезпечення VR, важливо класифікувати поточні виклики у цій галузі. Вищезазначені задачі відображають головні питання, визначені експертами у недавній науковій літературі. Кожна з них відображає конкретний бар'єр, який дослідники ретельно намагаються подолати з метою поліпшення загального досвіду у VR.

Різноманітність статей, що розглядалися, свідчить про обширний спектр цієї галузі. Наприклад, певні дослідники, як видно у [37], займаються задачами споживання потужності за допомогою вдосконалених апаратних методів, тоді як інші, як у [38], зосереджуються на питаннях щодо зручності використання та розробки у конкретних контекстах, таких як промислове застосування.

Стаття [42] розв'язує задачі пов'язані із використанням ресурсів кешу, вимогами до зберігання, пропускну здатністю зв'язку та затримкою, що сприяють покращенню зручності використання інтерактивних додатків VR для кінцевого користувача. Проте ця стаття не враховує питання споживання потужності, стабільності апаратури, портативності чи розробки.

У статті [43] автори представляють метод для вирішення задач затримки та поліпшення зручності для кінцевого користувача та ефективності розробки у системах віртуальної реальності. Незважаючи на те, що стаття не вирішує питання споживання потужності, стабільності апаратури чи портативності, можна припустити, що поліпшення точності схеми дизайну та зменшення часових витрат через запропоновану модель може мати непрямий вплив на стабільність апаратури та споживання потужності.

Якщо припустити, що схема, запропонована у [44], успішно реалізується, ймовірно, буде покращення зручності для кінцевого користувача завдяки збільшенню пропускну здатності та ясності передачі контенту VR. Проте ця схема може вимагати спеціалізованого апаратного чи програмного забезпечення для реалізації технології D2D мультикастингу та впровадження запропонованого двохетапного алгоритму. Це може призвести до викликів у стабільності апаратури, портативності та розробці.

#### Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

Майбутні дослідження у сфері VR повинні фокусуватися на інтегрованих рішеннях для оптимізації апаратного та програмного забезпечення. Оптимізація повинна включати зниження затримки, споживання енергії, підвищення стабільності апаратури, поліпшення користувацького досвіду, забезпечення портативності та ефективності розробки. Це потребує балансування реального часу та енергоефективності з урахуванням можливостей апаратури. Покращення користувацького досвіду включає ергономічний дизайн та зручні інтерфейси. Забезпечення портативності потребує адаптивності до різних обчислювальних середовищ. Спрощення розробки вимагає вдосконалених інструментів для створення, тестування та впровадження VR-додатків. Для досягнення цих цілей необхідний міждисциплінарний підхід та співпраця між дослідниками, інженерами, дизайнерами та експертами. Майбутні дослідження повинні акцентувати увагу на збалансованих методах для вирішення затримки, споживання енергії, стабільності апаратури, користувацького досвіду, портативності та ефективності розробки. Інтеграція VR в різні галузі, такі як навчання і розробка продуктів, обіцяє значне збільшення можливостей. Проте існують технологічні виклики у вигляді обробки даних, затримок та взаємодії. Для використання повного потенціалу VR у різних галузях потрібні комплексні рішення, які охоплюють весь шлях обробки даних та користувацький досвід [45-47].

Подолання цих викликів вимагає міждисциплінарного підходу та співпраці. Необхідно досліджувати питання безпеки VR, оскільки він може викликати нові загрози для даних і конфіденційності користувачів. Забезпечення безпеки у VR стосується як захисту даних, так і благополуччя користувачів. Необхідно досліджувати надійні фреймворки безпеки та методи шифрування для цього середовища [48-51].



Таблиця 1.

**Загальний аналіз задач оптимізації апаратного та програмного забезпечення VR**

Робота	Затримка	Споживана потужність	Апаратна стабільність	Зручність для кінцевого користувача	Портативність	Розробка
[19]	+	+	-	-	-	-
[36]	-	-	+	-	-	-
[37]	-	+	-	-	-	-
[38]	-	-	-	+	-	+
[39]	-	+	-	-	-	-
[40]	+	+	-	+	+	-
[41]	-	-	-	-	-	+
[42]	+	-	-	+	-	-
[43]	+	-	-	+	-	+
[44]	+	+	-	+	-	-

**Література**

1. Forbes, The Impact of AR and VR on Customer Experience. URL: <https://www.forbes.com/sites/forbestechcouncil/2023/04/13/the-impact-of-ar-and-vr-on-customer-experience/?sh=65a908567c3a> (accessed Aug. 05, 2023).
2. Entrepreneur. AR and VR Require Better Hardware, Software and Power for Mass Adoption. URL: <https://www.entrepreneur.com/science-technology/ar-and-vr-require-better-hardware-software-and-power-for/285259> (accessed Aug. 05 2023).
3. Semiconductor Engineering. Design and Security Challenges for VR. URL: <https://semiengineering.com/design-and-security-challenges-for-vr/> (accessed Aug. 05 2023).
4. Road to VR. The 3 Biggest Challenges Facing Augmented Reality Today. URL: <https://www.roadtovr.com/3-biggest-challenges-facing-augmented-reality-today> (accessed Aug. 05 2023).
5. Security Boulevard. “AR and VR Cybersecurity Challenges: Navigating New Frontiers. URL: <https://securityboulevard.com/2023/06/ar-and-vr-cybersecurity-challenges-navigating-new-frontiers/> (accessed Aug. 05 2023).
6. Brookings. Ensuring equitable access to AR/VR in higher education. URL: <https://www.brookings.edu/articles/ensuring-equitable-access-to-ar-vr-in-higher-education/> (accessed Aug. 05 2023).
7. TechTarget. VR Platform aims to give retailers entry into the metaverse. URL: <https://www.techtarget.com/searchenterpriseai/feature/VR-platform-aims-to-give-retailers-entry-into-the-metaverse/> (accessed Aug. 05 2023).
8. Yahoo Finance. Why Meta’s dropping prices for its VR headsets. URL: <https://finance.yahoo.com/news/why-metas-dropping-prices-for-its-vr-headsets-204637368.html> (accessed Aug. 05 2023).
9. Mixed News. Apple’s mixed-reality headset could feature very expensive displays. URL: <https://mixed-news.com/en/apple-mixed-reality-headset-expensive-displays/> (accessed Aug. 05 2023).
10. CoinTelegraph. The ethics of the metaverse: Privacy, ownership and control. URL: <https://cointelegraph.com/news/the-ethics-of-the-metaverse-privacy-ownership-and-control> (accessed Aug. 05 2023).
11. The Bulletin. Virtual Reality has arrived, but are humans ready for it? URL: <https://thebulletin.org/2023/03/virtual-reality-has-arrived-but-are-humans-ready-for-it/> (accessed Aug. 05 2023).
12. This Day. The Imperative for Ethical Considerations in AI Adoption. URL: <https://www.thisdaylive.com/index.php/2023/06/30/the-imperative-for-ethical-considerations-in-ai-adoption/> (accessed Aug. 05 2023).
13. Verdict. Data privacy concerns will be amplified by the metaverse. URL: <https://www.verdict.co.uk/data-privacy-metaverse-challenge/> (accessed Aug. 05 2023).
14. Chen J. et al. JOSS: Joint Exploration of CPU-Memory DVFS and Task Scheduling for Energy Efficiency, *Distributed, Parallel, and Cluster Computing (cs.DC)*, 2023, vol. 04615, pp. 1-11.
15. Zhang Z. et al. DVFO: Learning-Based DVFS for Energy-Efficient Edge-Cloud Collaborative Inference, *Machine Learning (cs.LG)*, 2023, vol. 01811, pp.1-16.
16. Wang Z., Mao W., Yang P., Wang Z., Lin J. An Efficient FPGA Accelerator for Point Cloud, *Signal Processing (eess.SP)*, 2023, vol.07803, pp. 1-6.
17. Liu Y. et al. An Investigation into the Comprehensive Impact of Self-Heating and Hot Carrier Injection, *Electronics*, vol. 11(17), 2022, pp.1-11.
18. Wang Y., Li Y., Yang Y., Chen W. Hot Carrier Injection Reliability in Nanoscale Field Effect. Transistors: Modeling and Simulation Methods. *Electronics*, 2022, vol.11, pp. 1-16.
19. Mandal D.K., Jandhyala S. Visual Inertial Odometry At the Edge: A Hardware-Software Co-design Approach for Ultra-low Latency and Power, *2019 Design, Automation & Test in Europe Conference & Exhibition (DATE)*, Florence, Italy, 2022, pp. 960-963.
20. Hazelwood D.A., Pecht M.G. Life Extension of Electronic Products: A Case Study of Smartphones, *IEEE Access*, 2021, vol. 9, pp. 144726-144739.
21. Jiang W., Sun L., Chen Y. Hardware-in-the-Loop-on-Chip Development System for Teaching and Development of Dynamic Systems, *Electronics*, 2021, vol.10, pp. 1-15.
22. Dinu A., Ogrutan P.L. Reinforcement Learning Made Affordable for Hardware Verification Engineers, *Micromachines*, 2022, vol. 13, pp. 1-28.
23. Riaño F.E. et al. “Reduction of Losses and Operating Costs in Distribution Networks Using a Genetic Algorithm and Mathematical Optimization,” *Electronics*, vol. 10, pp. 1-25, 2021.
24. Dey S. et al. CPU-GPU-Memory DVFS for Power-Efficient MPSoC in Mobile Cyber Physical System, *Future Internet*, 2022, vol. 14, pp. 1-14.
25. Nabavinejad S.M., Reda S., Ebrahimi M. Coordinated batching and DYFS for DNN inference on GPU accelerators, *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, vol. 33, no. 10, pp. 2496–2508, 2022.

26. Guo Y. et al. "Deep learning for 3d point clouds: A survey, *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 2020, vol. 43, no. 12, pp. 4338–4364.
27. Liao M.H., Hsieh C.P., Lee C.C., Systematic investigation of self-heating effect on CMOS logic transistors from 20 to 5nm technology nodes by experimental thermoelectric measurements and finite element modeling, *IEEE Trans. Electron Device*, 2017, vol. 64, pp. 646–648.
28. Mahapatra S., Sharma U. A Review of Hot Carrier Degradation in N-Channel Mosfets - Part I: Physical Mechanism, *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 67, pp. 2660–2671, 2022.
29. A.Erbsen et al. Integration Verification across Software and Hardware for a Simple Embedded System, *PLDI 2021: Proceedings of the 42nd ACM SIGPLAN International Conference on Programming Language Design and Implementation*, 2021, pp. 604–619.
30. Özçelik A., Löchtefeld M., Tollestrup C. Long-lasting smart products: Overview of longevity concepts in sustainable ICT and design for sustainability, *DRS2022: Bilbao, 25 June - 3 July, Bilbao, Spain*, 2022, vol. 1, pp. 1-18.
31. Haririan P. DVFS and Its Architectural Simulation Models for Improving Energy Efficiency of Complex Embedded Systems in Early Design Phase, *Computer*, 2020, vol. 9, pp. 1-21.
32. Khriji S., Chéour R., Kanoun O. Dynamic Voltage and Frequency Scaling and Duty-Cycling for Ultra Low-Power Wireless Sensor Nodes, *Electronics*, 2022, vol. 11, pp. 1-19.
33. Ben Yahya T. et al. The Effects of Data Security and Perceived Benefits on Mobile Phone Recycling Behaviour and the Recycling Intention Mediation Role, *Recycling*, 2023, vol. 8, pp. 1-26.
34. Montoya O.D. et al. Vortex search and Chu-Beasley genetic algorithms for optimal location and sizing of distributed generators in distribution networks: A novel hybrid approach, *Eng. Sci. Technol. Int. J.*, 2020, vol. 23, pp. 1351-1363.
35. Chang J. et al. Deep Reinforcement Learning for Dynamic Flexible Job Shop Scheduling with Random Job Arrival, *Processes*, 2022, vol. 10, pp. 1-20.
36. Gomez J., Patel S., Sarwar S et al. Distributed On-Sensor Compute System for AR/VR Devices: A Semi-Analytical Simulation Framework for Power Estimation, *Hardware Architecture (cs.AR); Machine Learning (cs.LG)*, 2022, vol. 07474, pp. 1-6.
37. Sumbul H. E. System-Level Design and Integration of a Prototype AR/VR Hardware Featuring a Custom Low-Power DNN Accelerator Chip in 7nm Technology for Codec Avatars, *2022 IEEE Custom Integrated Circuits Conference (CICC), Newport Beach, CA, USA*, 2022, pp. 1-8.
38. Chionna F., Cirillo P., Palmieri V., Bellone M. Proposed Hardware-Software Architecture for Virtual Reality in Industrial Applications, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 2015, vol. 56, pp 139-142.
39. Leng Y., Huang J., Chen C., Sun Q., Zhu Y., Energy-Efficient Video Processing for Virtual Reality, *IEEE Micro*, 2020, vol. 40, pp. 30-36.
40. Al Koutayni M.R., Rybalkin V., Elhayek A., Weis C., Reis G., Wehn N., Stricker D. Real-Time Energy Efficient Hand Pose Estimation: A Case Study, *Sensors*, 2020, vol. 20, pp. 1-25.
41. Wu L., Research on the Development and Application of Parallel Programming Technology in Heterogeneous Systems, *Journal of Physics: Conference Series*, 2022, vol. 2173, pp. 1-8.
42. Chuang S.M., Chen C.S., Hsiao-Kuang Wu E., The Implementation of Interactive VR Application and Caching Strategy Design on Mobile Edge Computing (MEC), *Electronics*, 2023, vol. 12, pp. 1-13.
43. Fu Q., Lv J., Zhao Z., Yue D. Research on Optimization Method of VR Task Scenario Resources Driven by User Cognitive Needs, *Information*, 2020, vol. 11, pp. 1-22.
44. Yang Y. et al. Open Access Resource allocation for virtual reality content sharing based on 5G D2D multicast communication, *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2020, vol. 1, pp.1-12.
45. de Freitas F.V. et al. "Benefits and Challenges of Virtual-Reality-Based Industrial Usability Testing and Design Reviews: A Patents Landscape and Literature Review," in *Applied Sciences*, 2022, vol. 12, pp.1-27.
46. Ruan J., Xie D., "Networked VR: State of the Art, Solutions, and Challenges," *Electronics*, 2021, vol. 10, pp.1-18.
47. Regal G. et al. Challenges in Virtual Reality Training for CBRN Events, *MTI*, 2023, vol. 7, pp.1-18.
48. Savenko B., Lysenko S., Bobrovnikova K., Savenko O., Markowsky G., Detection DNS Tunneling Botnets," *Proceedings 11th International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS), IDAACS'2021, Cracow, Poland, September 22-25, 2021*.
49. Lysenko S., Savenko O., Bobrovnikova K. DDoS Botnet Detection Technique Based on the Use of the Semi-Supervised Fuzzy c-Means Clustering. *CEUR-WS*, 2018, vol.2104, pp. 688-695.
50. Bobrovnikova K., Lysenko S., Savenko B., Gaj P., Savenko O., Technique for IoT malware detection based on control flow graph analysis. *Radioelectronic and Computer Systems*. 2022, pp. 141–153.
51. Lysenko S., Savenko O., Bobrovnikova K., Kryshchuk A., Savenko B. Information technology for botnets detection based on their behaviour in the corporate area network. *Communications in Computer and Information Science*. 2017, vol. 718, pp. 166–181.