

УДК 004

А.Яковенко, магістр гр. КІ-24М,

*Центральноукраїнський національний технічний університет*

## ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ПРИНЦИПИ ПОБУДОВИ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ РОЗПОДІЛЕНОЮ СЗД ЗА ДОПОМОГОЮ СПЕЦИФІКАЦІЇ NVME OVER FABRICS

У статті розроблено програмне забезпечення, яке призначено для системи керування розподіленою СЗД за допомогою специфікації NVMe over Fabrics. Метою розробки є дослідження та принципи побудови системи керування розподіленою СЗД за допомогою специфікації NVMe over Fabrics. Об'єктом дослідження є процес керування розподіленою СЗД за допомогою специфікації NVMe over Fabrics. Предметом дослідження є методи керування розподіленою СЗД за допомогою специфікації NVMe over Fabrics. Методи дослідження базуються на методах теорії побудови комп'ютерних мереж, методах математичної статистики, методах розробки програмного забезпечення. Результат роботи – програмна реалізація системи керування розподіленою СЗД за допомогою специфікації NVMe over Fabrics. В процесі роботи над програмною моделлю виконано аналіз існуючих апаратних та програмних засобів. В повній мірі описані всі компоненти розробленого програмного забезпечення.

### **керування розподіленою СЗД, NVMe over Fabrics**

**Постановка проблеми.** Багато компаній інвестують у NVMe-накопичувачі, очікуючи блискавичної швидкості, але вони все одно можуть зіткнутися зі зниженням продуктивності в мережі. Це пояснюється тим, що традиційні архітектури сховищ не розраховані на роботу з великими робочими навантаженнями сучасного часу, і, як наслідок, вони обмежують продуктивність.

На щастя, NVMe over Fabrics змінює все. Завдяки цій технології ви можете розкрити весь потенціал пристроїв NVMe Express у мережі, не витрачаючи інвестиції на застарілі протоколи.

NVMe поверх Fabrics дозволяє організаціям скорочувати час відгуку програм і масштабувати сховище незалежно від обчислень. Він навіть підтримує робочі навантаження штучного інтелекту (ШІ) та машинного навчання (ML), які б перевершили традиційні мережі зберігання даних (SAN).

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** При аналізі останніх досліджень і публікацій [1-10] було виявлено певні прогалини у забезпеченні системи керування розподіленою СЗД за допомогою специфікації NVMe over Fabrics.

**Мета й завдання дослідження.** Метою роботи є дослідження та принципи побудови системи керування розподіленою СЗД за допомогою специфікації NVMe over Fabrics.

Для досягнення поставленої мети визначена програма дослідження, що складається з наступних завдань:

- Огляд існуючих систем керування розподіленою СЗД за допомогою специфікації NVMe over Fabrics.

- Дослідження системи керування розподіленою СЗД за допомогою специфікації NVMe over Fabrics.

- Програмна реалізація системи керування розподіленою СЗД за допомогою специфікації NVMe over Fabrics.

Об'єктом дослідження є процес керування розподіленою СЗД за допомогою специфікації NVMe over Fabrics.

Предметом дослідження є методи керування розподіленою СЗД за допомогою специфікації NVMe over Fabrics.

Методи дослідження базуються на методах теорії побудови комп'ютерних мереж, методах математичної статистики, методах розробки програмного забезпечення.

**Виклад основного матеріалу.** NVMe over Fabrics – це протокол, який передає набір команд NVMe через високошвидкісні мережеві транспортні мережі, або «фабрики», завдяки чому хости можуть отримувати доступ до віддаленого сховища NVMe з майже локальною продуктивністю. Замість того, щоб обмежувати пристрої NVMe прямим підключенням PCIe, NVMe-oF дозволяє отримати доступ до такої ж блискавичної продуктивності в мережевих фабриках.

Масиви NVMe стають спільними ресурсами, оскільки кілька серверів можуть використовувати один і той самий високошвидкісний пул сховища, не жертвуючи часом відгуку в мікросекундах.

Специфікація NVMe over Fabrics також підтримує ті ж ефективні набори команд, що й локальний NVMe. Ви зберігаєте всі ті характеристики продуктивності, які роблять NVMe особливим:

- Архітектура паралельної черги.
- Оптимізований стек протоколів.
- Можливості прямого доступу до пам'яті.

В результаті, інфраструктура більше не обмежується одним корпусом, а це означає, що обчислювальні системи та системи зберігання даних можуть розташовуватися в різних стійках або навіть у різних будівлях.

#### **NVMe-oF проти традиційного NVMe: ключові відмінності**

Традиційний NVMe підключається безпосередньо через PCIe з одним диском та одним хостом, що просто, але обмежує можливості.

Сервери NVMe поверх Fabric змінюють це. Ваша специфікація NVMe тепер працює в мережах Ethernet, Fibre Channel або InfiniBand, забезпечуючи таку ж ефективність протоколу, але з розширеним охопленням.

Традиційний NVMe:

- Тільки локальний доступ.
- Один хост на диск.
- Обмежено доступністю слота PCIe.
- Масштабування означає купівлю більшої кількості серверів.

NVMe-oF:

- Доступ по всій мережі.
- Кілька хостів спільно використовують сховище.
- Необмежений потенціал масштабування.
- Додайте потужність, не торкаючись обчислювальних ресурсів.

Ця технологія по суті перетворює локальне сховище на мережеве без типового зниження продуктивності.

#### **Основні компоненти архітектури NVMe-oF**

Побудова інфраструктури NVMe-oF вимагає трьох критично важливих елементів, які безперерійно працюють разом.

1. Підсистеми та контролери NVMe формують основу. Кожна підсистема керує колекцією просторів імен (уявіть їх як віртуальні диски). Контролери обробляють фактичні операції вводу/виводу, підтримуючи ті паралельні черги, які дають NVMe перевагу в швидкості.

Ваша підсистема може містити десятки просторів імен. Кожен хост підключається до певних просторів імен на основі вимог до доступу, і всі вони керуються через одну ефективну платформу.

2. Рівень Storage Fabric об'єднує все разом. Незалежно від того, чи ви оберете конвергентний Ethernet, мережі зберігання даних (SAN) чи спеціалізовані мережі, цей рівень передає команди NVMe по мережі.

3. Технологія віддаленого прямого доступу до пам'яті (RDMA) забезпечує зв'язок з наднизькою затримкою, минаючи традиційні накладні витрати мережевого стеку.

Існує три основні варіанти RDMA:

- RoCE NVMe поверх Fabric (RDMA поверх конвергентного Ethernet) – працює з існуючою інфраструктурою Ethernet.
- iWARP – сумісний з TCP/IP, але менш поширений.
- InfiniBand – максимальна продуктивність, але вимагає спеціального обладнання.

#### **Пояснення транспортних протоколів**

Вибір транспортного протоколу визначає складність розгортання та потенціал продуктивності.

NVMe через Fibre Channel використовує існуючі інвестиції в SAN. Ви можете зберегти своє зонування, комутатори та інструменти керування. Просто оновіть прошивку, і система готова до роботи.

NVMe через TCP не потребує спеціального обладнання, і будь-яка мережа Ethernet його підтримує. Продуктивність не зрівняється з опціями RDMA, але ви все одно побачите значні покращення порівняно з iSCSI. Він ідеально підходить для віддалених офісів або хмарних розгортань, де спеціалізоване обладнання непрактичне.

NVMe поверх RoCE забезпечує продуктивність, близьку до InfiniBand, у мережах Ethernet. Вам знадобляться мережеві карти з підтримкою RoCE та конфігурацією Ethernet без втрат. Хоча налаштування складніше, ніж TCP, інвестиції варті того для робочих навантажень, чутливих до затримки.

#### **Ключові переваги NVMe над Fabrics для корпоративних IT-технологій**

NVMe-oF пропонує кілька ключових переваг, які змінюють підхід до проектування рішень для корпоративних IT:

- Радикальне скорочення затримки. Затримка може становити всього 10 мікросекунд для віддаленого доступу до сховища, тоді як у застарілій мережі зберігання даних вона вимірюється мілісекундами. Це 100-кратне покращення для критичних робочих навантажень.

- Масовий паралелізм. Кожне з'єднання підтримує 65 535 черг з 65 535 командами кожна.

- Справжня масштабованість. Ви можете додавати NVMe-диски до свого пулу без налаштування серверів або оновлювати обчислювальні ресурси без перенесення даних. Така архітектура дозволяє незалежне масштабування кожного рівня залежно від фактичних потреб.

- Захист інвестицій. Існуюча інфраструктура NVMe стає спільним ресурсом, доступним для всіх серверів у вашому середовищі, що максимізує використання та усуває невикористані потужності.

#### **NVMe-oF у дії: варіанти використання**

Організації розгортають NVMe-oF для робочих навантажень, які потребують продуктивності, що перевищує ту, яку можуть забезпечити традиційні сховища, у кількох ключових випадках використання:

- Навчання зі штучного інтелекту/машинного навчання (ШІ/МО) виграє від масивних паралельних потоків даних.

- Платформи аналітики в режимі реального часу обробляють потокові дані без затримок буферизації. Наприклад, фінансові торгові системи можуть приймати рішення за мікросекунди.

- Інфраструктура віртуальних робочих столів забезпечує локальну продуктивність тисячам користувачів. Завдяки оптимізованим віртуальним робочим столам і тонким

клієнтам організації стикаються з меншою кількістю скарг на повільний вхід у систему або запуск програм.

– Кластери баз даних досягають раніше неможливої кількості операцій вводу/виводу за секунду (IOPS).

#### **NVMe-oF проти інших архітектур сховищ**

Порівняння NVMe-oF зі старими протоколами виявляє разючі відмінності в продуктивності:

iSCSI не може конкурувати за затримкою, оскільки додає накладні витрати TCP/IP, яких NVMe-oF уникає. У деяких випадках, перейшовши на NVMe-oF, можна досягти покращення затримки до 10 разів.

Традиційному Fibre Channel бракує ефективної структури команд NVMe. Навіть використовуючи одну й ту саму фізичну мережу, системи можуть мати суттєво різну продуктивність з NVMe-oF.

Масиви SAS/SATA досягають межі приблизно 100-200 тисяч IOPS. Кластери NVMe-oF забезпечують мільйони IOPS.

#### **Міркування та проблеми розгортання**

Незважаючи на всі переваги управління конфігурацією, успішне розгортання вимагає ретельного планування.

Ваша мережа повинна підтримувати передачу даних без втрат для протоколів RDMA. Комутатори потребують належного керування буфером та потоком. Сумісність драйверів та прошивок різних постачальників залишається складною, тому перед розгортанням у робочому середовищі ретельно протестуйте їх, порівнюючи веб- та хмарні рішення. Крім того, конфігурації з кількома шляхами потребують особливої уваги до NVMe.

Крім того, моделі безпеки відрізняються від традиційних мереж SAN, а варіанти шифрування під час роботи залежать від транспортного засобу. Тому важливо дотримуватися всіх застосовних правил кібербезпеки IT-інфраструктури та заздалегідь планувати стратегію автентифікації та шифрування.

У середовищі Fibre Channel технологія NVMe-oF підтримує протокол зв'язку NVMe-oF на FC-SAN (мережі зберігання даних Fibre Channel) з використанням існуючих мережевих пристроїв Fibre Channel.

Щоб налаштувати систему, що складається з хоста та системи зберігання даних, використовуючи протокол зв'язку NVMe-oF, зареєструйте логічний том системи зберігання даних як простір імен у підсистемі NVM, а потім налаштуйте маршрут вводу/виводу даних від хоста до логічного тому.

Звичайні Fibre Channel та iSCSI вимагають зіставлення LU для порту для керування маршрутом доступу між хостом і логічним томом. NVMe-oF, з іншого боку, вимагає налаштування наступних системних компонентів на системі зберігання даних між хостом і логічним томом.

– Підсистема NVM: Система керування флеш-пам'яттю, яка підтримує протокол зв'язку NVMe-oF з одним або кількома просторами імен та одним або кількома портами зв'язку (порти підсистеми NVM).

– Простір імен: простір флеш-пам'яті, відформатований у логічний блок.

– Порт підсистеми NVM: порт FC, налаштований на режим NVMe.

– Ідентифікація хоста (NQN хоста): кваліфікатор імені хоста.

– Шлях простору імен хоста: дозвіл на доступ до простору імен для кожного NQN хоста, зареєстрованого в підсистемі NVM.

#### **Огляд безпеки простору імен**

NVMe-oF дозволяє використовувати функції безпеки простору імен замість безпеки LUN, яка використовує звичайне з'єднання Fibre Channel (FC-SCSI).

Щоб використовувати функції безпеки простору імен, необхідно ввімкнути налаштування безпеки простору імен у підсистемі NVM. Вам не потрібно налаштовувати налаштування безпеки LUN для порту Fibre Channel.

Коли ввімкнено безпеку простору імен, логічний том, до якого хост може отримати доступ, визначається налаштуваннями NQN хоста для підсистеми NVM та простору імен. Хост може отримати доступ лише до логічного тому, призначеного підсистемі NVM та простору імен, для якого встановлено NQN хоста.

#### **Обмеження на використання NVMe поверх FC**

Конфігурації та налаштування мережі зберігання даних:

– NVMe-oF вимагає налаштування мережі зберігання даних Fibre Channel. Налаштування зонування комутатора FC та з'єднання оптоволоконного кабелю мають бути такими ж, як і для звичайного Fibre Channel. Існуючі функції зонування мережі доступні на рівні комутатора для пристрою NVMe-oF.

– Перевірте правильність конфігурації комутатора FC, дотримуючись інструкцій, наданих постачальником комутатора FC.

Конфігурації та налаштування хост-сервера:

– Хост, який підключається до цільової системи зберігання даних, має бути налаштований з ОС та адаптером шини хоста (HBA), що підтримують NVMe-oF. Щоб отримати додаткові відомості про комбінацію ОС та адаптера HBA, що підтримують підключення до системи зберігання даних, зверніться до служби підтримки клієнтів.

– Можливо, знадобиться встановити програмне забезпечення, необхідне для використання NVMe-oF, на хост або прошивку, а також драйвер для HBA. Після встановлення HBA його налаштування, можливо, знадобиться змінити. Дотримуйтесь інструкцій, наданих кожною ОС та постачальником HBA.

– Перевірка розпізнавання пристрою на хості може відрізнитися від звичайної перевірки Fibre Channel (FC-SCSI). Дотримуйтесь інструкцій для платформ, які підтримують підключення до системи зберігання даних.

Налаштування NVMe-oF:

– Операції з підготовки до роботи на NVMe-oF (підсистема NVM, порт підсистеми NVM, простір імен, налаштування NQN хоста тощо) не можуть бути реалізовані з Диспетчера пристроїв – Storage Navigator та Storage Advisor Embedded. Ці операції необхідно виконувати за допомогою Command Control Interface.

– Порт Fibre Channel для NVMe-oF не можна використовувати для деяких налаштувань хоста SCSI та деяких операцій Fibre Channel.

Додаткові обмеження:

– Перш ніж виконувати наступну операцію, переконайтеся, що на хості не виконуються операції вводу-виводу та що вони не змонтовано. Виконання операції під час виконання операції вводу-виводу або монтування тома призведе до відключення системи зберігання даних та хоста:

○ Увімкнення безпеки простору імен.

– Перш ніж виконувати наступні операції, переконайтеся, що хост не виконує операції вводу-виводу та що не змонтовано жодних томів:

○ Видалення простору імен

○ Видалення шляху доступу (шляху простору імен хоста) між NQN хоста та простором імен

○ Видалення порту підсистеми NVM

○ Зміна швидкості передачі даних для порту Fibre Channel

○ Зміна налаштування перемикача тканини

○ Зміна топології

○ Зміна режиму хоста

○ Видалення групи хостів

– Перш ніж змінювати режим роботи порту, переконайтеся, що на порту каналу не виконуються такі операції:

- Додавання віддаленого шляху
- Додавання зовнішнього шляху
- Налаштування з'єднання між системою зберігання даних і сервером, зареєстрованим у Storage Advisor Embedded

– Встановіть глибину черги хоста таким чином, щоб кількість множинних виконань команд становила 1024 або менше для кожного порту каналу. Значення вище 1024 може призвести до значного зниження продуктивності хоста, а потім до збою, такого як переривання завдання.

#### **Налаштування NVMe через FC для хоста та системи зберігання даних**

Щоб використовувати NVMe-oF як протокол зв'язку між хостами та системами зберігання даних, необхідно вказати певні параметри.

#### **Рекомендації щодо керування підсистемою NVM як ресурсом керування сховищем**

NVMe-oF вимагає реєстрації підсистеми NVM, яка не використовується у звичайних FC та iSCSI, як ресурсу керування сховищем. Ви несете відповідальність за створення груп ресурсів та розподіл ресурсів відповідно до операцій підсистеми NVM, таких як спільне використання або виключне використання підсистеми NVM користувачем або відділом сховища.

Дотримуйтесь цих інструкцій щодо керування підсистемою NVM як ресурсом сховища:

– Щоб включити підсистему NVM до групи ресурсів користувача, вкажіть ідентифікатор підсистеми NVM, який є номером керування підсистемою NVM у системі зберігання даних. Якщо ідентифікатор підсистеми NVM не переміщено до жодної групи ресурсів, підсистема NVM доступна як ресурс, призначений мета-ресурсом за замовчуванням.

– Щоб перенести ресурси, що використовуються для NVMe-oF, скористайтеся командою Command Control Interface `raidcom add resource`.

У наступному прикладі перенесено ідентифікатор 1 підсистеми NVM до групи ресурсів. `sql_srv`.

```
# raidcom додати ресурс -resource_name sql_srv -nvm_subsystem_id 1
```

Щоб отримати додаткові відомості про те, як виконати команду Command Control Interface та вказати опцію, див. Посібник користувача та довідник з Command Control Interface та Довідник з команд Command Control Interface.

– Віртуальні сховища не підтримують протокол NVMe-oF. Ресурси, що використовуються для NVMe-oF, не можна перемістити до групи ресурсів, для якої встановлено віртуальний ідентифікатор як віртуальне сховище.

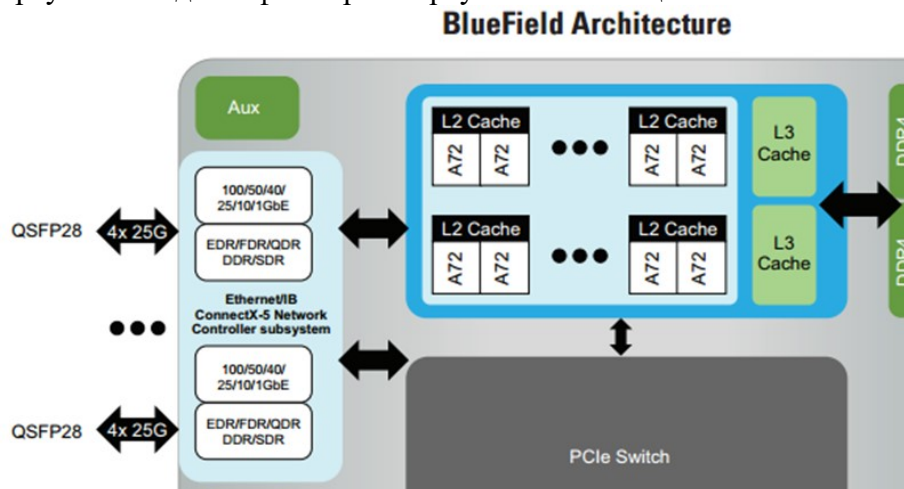


Рисунок 1 – Структурна схема системи

**Налаштування порту Fibre Channel, з яким взаємодіє підсистема NVM**

Ви можете налаштувати порт Fibre Channel, з яким зв'язується підсистема NVM:

1. Перевірте розрив з'єднання між хостом та портом цільового каналу.
2. Встановіть режим роботи порту на режим NVMe.
3. Встановіть топологію та швидкість каналу порту.

**Встановлення режиму роботи порту Fibre Channel на режим NVMe**

Ви можете налаштувати режим NVMe, щоб увімкнути зв'язок на порту Fibre Channel за допомогою протоколу NVMe-oF, а потім встановити порт Fibre Channel як порт підсистеми NVM у підсистемі NVM. Режим роботи порту за замовчуванням – це режим SCSI. Якщо змінити режим роботи порту на режим NVMe, наведені нижче параметри неможливо буде налаштувати. Обов'язково встановіть режим NVMe після виконання попередніх вимог.

- Підключення до порту адаптера хост-шини, який працює за протоколом FC-SCSI, або до зовнішнього порту на системі зберігання даних.
- Визначте шлях SCSI (додайте шлях LU).
- Змініть налаштування групи хостів за допомогою Диспетчера пристроїв – Навігатора сховища
  - Додати віддалений шлях.
  - Додайте зовнішній шлях.
  - Налаштування з'єднання між системою зберігання даних та сервером, зареєстрованим у Storage Advisor Embedded.

**Висновки.** У статті наведені теоретичне узагальнення й рішення наукового завдання дослідження методів керування розподіленою СЗД за допомогою специфікації NVMe over Fabrics. Рішення даного завдання полягало у вирішенні наступних задач:

- Був проведений огляд існуючих систем керування розподіленою СЗД за допомогою специфікації NVMe over Fabrics.
- Досліджена система керування розподіленою СЗД за допомогою специфікації NVMe over Fabrics.
- На основі отриманих результатів досліджень створена програмна реалізація системи керування розподіленою СЗД за допомогою специфікації NVMe over Fabrics.

Розроблені алгоритми дозволяють успішно вирішувати завдання керування розподіленою СЗД за допомогою специфікації NVMe over Fabrics. Проведено аналіз предметної галузі в ході якого були виявлені об'єкти, взаємодія яких носить істотний характер для функціональної діяльності предметної галузі, і їхні основні характеристики; побудована алгоритм і вибраний середовище розробки.

**Список літератури**

1. Al-Mudhafar Aqeel, A.M., Smirnova, T., Buravchenko, K., Smirnov, O. «The method of assessing and improving the user experience of subscribers in software-configured networks based on the use of machine learning». *Advanced Information Systems*, 2023, 7(2), pp. 49-56.
2. Smirnov, O., Sydorenko, V., Aleksander, M., Zhyharevych, O., Yanchev, S. «Simulation of the cloud IoT-based monitoring system for critical infrastructures». *CEUR Workshop Proceedings, Volume 3530*, 2023, pp. 256-265.
3. Smirnov, O., Odarchenko, R., Smirnova, T., Bondar, S., Volosheniuk, D. «Optimal Structure Construction of Private 5G Network for the Needs of Enterprises». *Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies*, 2023, 178, pp. 208–223.
4. Аль-Мудхафар Акіл Абдулхуссейн М., Смірнова Т.В., Буравченко К.О., Смірнов О.А. «Метод оцінки та підвищення користувальницького досвіду абонентів в програмно-конфігурованих мережах на основі використання машинного навчання». *Сучасні інформаційні системи*, 2023, том 7, № 2, С. 49-56.
5. Smirnova, T., Gnatyuk, S., Yudin, O., Sydorenko, V., Polozhentsev, A., «The Model for Calculating the Quantitative Criteria for Assessing the Security Level of Information and Telecommunication Systems». *CEUR Workshop Proceedings Volume 3156*, 2022, Pages 390-399.
6. Смірнова Т.В., Гнатюк С.О., Сидоренко В.М., Юдін О.Ю., Сидоренко С.Ю., «Модель визначення критичності галузевих інформаційно-телекомунікаційних систем». *Проблеми інформатизації та управління*,

№ 2(70). 2022. С. 28-37.

7. Смірнов О.А., Смірнова Т.В., Якименко Н.М., Смірнов С.А., Поліщук Л.І., «Дослідження стійкості до диференціального криптоаналізу запропонованої функції гешування удосконаленого модуля криптографічного захисту в інформаційно-комунікаційних системах» Системи управління, навігації та зв'язку, 2022, № 3(69). С. 93-98.
8. Смірнов О.А., Смірнова Т.В., Якименко Н.М., Поліщук Л.І., Смірнов С.А. «Дослідження статистичної стійкості та швидкісних характеристик запропонованої функції гешування удосконаленого модуля криптографічного захисту в інформаційно-комунікаційних системах» Вісник Хмельницького національного університету. Серія: «Технічні науки», № 2 (307). С. 46-52. 2022.
9. Смірнов О.А., Смірнова Т.В., Константинова Л.В., Смірнов С.А., Якименко Н.М., «Дослідження стійкості до лінійного криптоаналізу запропонованої функції гешування удосконаленого модуля криптографічного захисту в інформаційно-комунікаційних системах» Системи управління, навігації та зв'язку, 2022, № 1(67). С. 84-89.
10. Smirnova T., Gnatyuk S., Berdibayev R., Avkurova Zh., Iavich M. «Cloud-Based Cyber Incidents Response System and Software Tools». Communications in Computer and Information Science, 2021, vol 1486. Springer, Cham. pp 169-184.
11. Smirnov O., Kuznetsov A., Kiian A., Kuznetsova T. «Non-binary constant weight coding technique». CEUR Workshop Proceedings. Volume 2740, 2020, Pages 102-114.
12. Smirnov O., Alimseitova Zh., Adranova A., Akhmetov B., Lakhno V., Zhilkishbayeva G. «Models and algorithms for ensuring functional stability and cybersecurity of virtual cloud resources». Journal of theoretical and applied information technology Vol.98. No 21, 2020, P. 3334-3346.
13. Smirnov O., Kuznetsov A., Kiian A., Cherep A., Kanabekova M., Chepurko I. «Testing of code-based pseudorandom number generators for post-quantum application». 2020 IEEE 11th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies (DESSERT), Ukraine, Kyiv, May 14-18. 2020. P. 172-177.
14. Smirnov O., Kuznetsov A., Pushkar'ov A., Serhiienko R., Babenko V., Kuznetsova T., «Representation of Cascade Codes in the Frequency Domain». In: Radivilova T., Ageyev D., Kryvinska N. (eds) Data-Centric Business and Applications. Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies, vol 48. Springer, Cham. 2021. pp 557-587.
15. Smirnov, O., Markovets, O. Vovk, N., Turchyn, Y., «Model of informational support for social network administrators' content creation». CEUR Workshop Proceedings Volume 2616, 2020, Pages 125-136.
16. Smirnov, O., Drieieva, H., Drieiev, O., Polishchuk, Y., Brzhanov, R., Aleksander, M. «Method of fractal traffic generation by a model of generator on the graph». CEUR Workshop Proceedings Volume 2616, 2020, Pages 366-379.
17. Smirnov, O., Drieieva, H., Drieiev, O., Simakhin, V., Bondar, S., Odarchenko, R. «Managing multifractal properties of the binary sequence generated with the Markov chains», CEUR Workshop Proceedings Volume 2608, 2020, Pages 633-645.
18. Smirnov O. Kuznetsov A., Zaichenko Yu., Pastukhov M., Oleshko O., Kuznetsova K., «Formation of Discrete Signals with Special Correlation Properties». International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics, UkrMiCo 2019; Odessa; Ukraine; 9-13 September 2019. P.22-28.
19. Smirnov, O., Kuznetsov, A., Kolovanova, I., Kuznetsova, T., «Noise immunity of the algebraic geometric codes». International Journal of Computing; 2019, Volume 18, Issue 4 – Research Institute for Intelligent Computer Systems – 2019. – P. 393-407.
20. Smirnov, O., Kuznetsov, A., Reshetniak, O., Ivko, N., Katkova, T., Kuznetsova, T., «Generators of Pseudorandom Sequence with Multilevel Function of Correlation». 2019 IEEE International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications, Science and Technology (PIC S&T), Kyiv, Ukraine, 8 – 11 October 2019 . P.517-522.
21. Smirnov, O., Odarchenko, R., Abakumova, A., Usik, P., Kundyz, M., «QoE optimization technique for media delivery in 5G networks». 2019 IEEE International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications, Science and Technology (PIC S&T), Kyiv, Ukraine, 8 – 11 October 2019. P.597-601.
22. Smirnov, O., Krasnobayev, V., Yanko, A., Kuznetsova, T. «Methods of nulling numbers in the system of residual classes». CEUR Workshop Proceedings, Vol 2588, P. 90-106, 2019.
23. Smirnov, O., Kuznetsov, A., Kovalchuk, D., Averchev, A., Pastukhov, M., Kuznetsova, K., «Formation of Pseudorandom Sequences with Special Correlation Properties», 2019 3rd International Conference on Advanced Information and Communications Technologies, AICT -2019/ Lviv, Ukraine, 2-6 July, 2019, P. 395-399.
24. Smirnov, O., Kuznetsov, A., Kiian, A., Zamula, A., Rudenko, S., Hryhorenko, V., «Variance Analysis of Networks Traffic for Intrusion Detection in Smart Grids», 2019 IEEE 6th International Conference On Energy Smart Systems (2019 IEEE ESS), Kyiv, Ukraine April 17-19, 2019 P. 353-358.
25. Smirnov, O., Kuznetsov, A., Kavun, S., Babenko, B., Nakisko, O., Kuznetsova, K., «Malware Correlation Monitoring in Computer Networks of Promising Smart Grids», 2019 IEEE 6th International Conference On Energy Smart Systems (2019 IEEE ESS), Kyiv, Ukraine April 17-19, 2019 P. 347-352.
26. Smirnov, O., Kuznetsov, A., Kovalchuk, D., Pastukhov, M., Kuznetsova, K., Prokopovych-Tkachenko, D., «Discrete Signals with Special Correlation Properties», CEUR Workshop Proceedings Volume 2353, CEUR

Workshop Proceedings 2019, Pages 618-629.

27. Smirnov A.A., Kuznetsov A.A., Danilenko D.A., Berezovsky A., «The statistical analysis of a network traffic for the intrusion detection and prevention systems», Telecommunications and Radio Engineering. – Volume 74, Issue 1. – Begel House Inc. – 2015. – P. 61-78.
28. Смірнов О.А., Смірнова Т.В., Буравченко К.О., Кравченко С.С., Горбов В.О., «Хмарна система підтримки прийняття рішень технологічного процесу відновлення поверхонь конструкцій і деталей машин». Сучасні інформаційні системи. 2021. Т. 5, № 4. С. 79-95
29. Смірнов О.А., Усік П.С., Миронець І.В., Буравченко К.О., Якименко Н.М. «Метод підвищення ефективності розподіленої обробки даних у комп'ютерних системах операторів стільникового зв'язку» Вісник Черкаського державного технологічного університету. Технічні науки. №4. С. 103-110. 2020.
30. О.А.Смірнов, Т.В.Смірнова, Л.І. Поліщук, К.О. Буравченко, А.О.Макевнін, «Дослідження хмарних технологій як сервісів», Кібербезпека: освіта, наука, техніка. № 3(7). С. 43-62. 2020.
31. Смірнов О.А., Коноплицька-Слободенюк О.К., Смірнов С.А., Буравченко К.О., Смірнова Т.В., Поліщук Л.І. Інформаційна безпека в комп'ютерних мережах. Навчальний посібник – Кропивницький: вид. Лисенко В.Ф. 2020. – 294 с.
32. О.А. Смірнов, П.С. Усік, «дослідження перспектив використання технологічних рішень в мережах 5g» у Кібербезпека та інформаційні технології: монографія. – Х. : ТОВ «ДІСА ПЛЮС», 2020.С. 122-135.