

УДК 004

**О.Кривда, магістр гр. КІ-24М,***Центральноукраїнський національний технічний університет*

## ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ПРИНЦИПИ ПОБУДОВИ СИСТЕМИ ДЕДУПЛІКАЦІЇ В ІНФРАСТРУКТУРІ РЕЗЕРВНОГО КОПІЮВАННЯ

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

**дедуплікація, інфраструктура, резервне копіювання**

**Постановка проблеми.** Дедуплікація знайшла широке застосування як спосіб упоратися з ростом витрат на інфраструктуру резервного копіювання при збільшенні обсягів даних.

Доступність і схоронність даних – застава безперервності бізнес-процесів і ефективності роботи. Сьогодні дані – один із самих коштовних активів, тому їхнє резервне копіювання й архівне зберігання – найбільш типові завдання, а система резервного копіювання – важлива частина будь-якої корпоративної інформаційної системи. При правильній організації вона здатна надійно захистити критичні дані.

Впровадження систем резервного копіювання дає можливість оперативно відновлювати інформацію в самих різних ситуаціях, однак і вони не позбавлені недоліків. Традиційні проблеми – неефективне використання ємності зберігання (обсяг резервних копій за тиждень може вдвічі перевищити обсяг вихідних даних), низька швидкість копіювання, непередбачений час відновлення (як правило, набагато більше планованого), не дуже висока надійність (по даним Gartner, ризик неможливості відновлення перевищує 10%).

Рішення для резервного копіювання й відновлення повинні ефективно функціонувати в умовах експонентного росту даних, жорсткості вимог регуляторів і скорочення вікон резервного копіювання. Україй бажано також забезпечити зниження витрат, пов'язаних із захистом даних. Перебороти перераховані проблеми покликана дедуплікація даних. У том або іншому виді її пропонують у своїх продуктах всі провідні вендори систем резервного копіювання корпоративного класу.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** При аналізі останніх досліджень і публікацій [1-30] було виявлено певні прогалини у забезпеченні системи дедуплікації в інфраструктурі резервного копіювання.

**Мета й завдання дослідження.** Метою роботи є дослідження та принципи побудови системи дедуплікації в інфраструктурі резервного копіювання.

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

- Огляд існуючих систем дедуплікації в інфраструктурі резервного копіювання.
- Дослідження системи дедуплікації в інфраструктурі резервного копіювання.

– Програмна реалізація системи дедуплікації в інфраструктурі резервного копіювання.

*Об'єктом дослідження* є процес дедуплікації в інфраструктурі резервного копіювання.

*Предметом дослідження* є методи дедуплікації в інфраструктурі резервного копіювання.

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

**Виклад основного матеріалу.** Дедуплікація буває різна – на рівні файлів, блоків даних і навіть на бітовому рівні. Використовується блокова дедуплікація. Файли розбиваються на невеликі блоки різного розміру (32-128 КБ), визначаються дублюючі блоки й зберігається одна копія кожного блоку. Надлишкові копії блоку замінюються посиланнями на цю єдину копію. Блоки організуються у файли-контейнери, які можуть стискуватися для подальшої оптимізації використання простору, і містяться в сховище блоків.

Для приклада припустимо, у нас є два файли – File1 і File2. У вихідному стані вони містять метадані (ім'я файлу, атрибути й т.п.) і самі дані.

Після дедуплікації дані з File1 і File2 видаляються й замінюються заглушками, що вказують на відповідні блоки даних, що зберігаються в загальному сховищі блоків. Тому що блоки А, В і С однакові для обох файлів, вони зберігаються в єдиній копії, що знижує обсяг дискового простору, необхідний для зберігання обох файлів.

Під час доступу до одного з файлів відповідні блоки збираються разом. При цьому користувач або додаток працюють із файлом як і раніше, не підозрюючи про те, що файл був підданий перетворенням. Це дозволяє застосовувати дедуплікацію, не турбуючись про її вплив на поведінку застосунків або доступ користувачів до файлу.

Таким чином, після включення дедуплікації тому й оптимізації даних том містить:

– Оптимізовані файли (файли точок повторного аналізу) які містять покажчики на відповідні блоки даних у сховище блоків, необхідні для побудови вихідного файлу.

– Сховище блоків (дані оптимізованих файлів).

– Неоптимізовані файли (тобто пропущені файли, наприклад файли стану системи, зашифровані файли, файли з додатковими атрибутами або файли розміром менш 32 КБ).

### **Планування**

Дедуплікація може значно знизити споживаний дисковий простір (на 50-90% і більше), але тільки при правильному плануванні. Тому при виборі об'єкта для дедуплікації варто враховувати деякі моменти.

### **Тип даних**

Ефективність дедуплікації дуже сильно залежить від типу даних. Так мультимедійні файли (фотографії, музика, відео) практично не містять повторюваних даних, тому їх дедуплікація не дасть великої економії. У той же час файли віртуальних машин (VHD) чудово дедуплікуються й на них економія може становити до 95 %. Із цієї причини перед включенням дедуплікації рекомендується виконати попередню оцінку даних на предмет дедуплікуємості.

### **Частота зміни файлів**

Файли, які часто змінюються й до яких часто звертаються користувачі або додатки, не дуже підходять для дедуплікації. Постійний доступ до даних і їхній зміна швидше за все зведуть нанівець всі результати дедуплікації й можуть просто не дати дедуплікації можливості обробити файли. Простіше говорячи, для дедуплікації добре підійдуть дані, які часто читають, але рідко змінюють.

### **Завантаженість сервера**

Під час дедуплікації виконується читання, обробка й запис великого обсягу даних. Цей процес споживає ресурси сервера, що необхідно враховувати при плануванні розгортання. Як правило, сервера мають періоди високої й низької активності. Більшу

частину дедуплікації можливо виконати, коли ресурси доступні. Постійно високонагруженні сервера не рекомендується використовувати для дедуплікації.

Не рекомендується виконувати дедуплікацію файлів, які відкриті, постійно змінюються протягом тривалого періоду часу або мають високі вимоги вводу/виводу, наприклад файли працюючих віртуальних машин, динамічних баз даних SQL або активних сеансів VDI. Справа в тому, що при дедуплікації не виконується обробка файлів, відкритих постійно в монопольному режимі для запису. Це значить, що дедуплікація не буде проведена доти, поки файл не буде закритий. Тільки тоді завдання оптимізації виконає спробу обробити файл, що відповідає обраним параметрам політики дедуплікації.

У принципі дедуплікацію можливо налаштувати на обробку постійно, що змінюються файлів. Але в цьому випадку можлива ситуація, коли процес оптимізації не зможе одержати доступ до цих файлів і пропустить їхню обробку. Не варто витрачати ресурси сервера на дедуплікацію файлів, у які постійно записуються нові дані.

Приведу рекомендації Microsoft. Для дедуплікації:

Не рекомендується

- Сервера Hyper-V.
- VHD-Файли запущених віртуальних машин.
- Служби WSUS.
- Сервера SQL і Exchange.
- Будь-які файли, розмір яких дорівнює або більше 1 Тб.

Рекомендується:

- Файлові ресурси загального доступу (загальні папки, профілі й домашні папки користувачів, інші файлопомойки).
- Розгортання програмних продуктів (бінарники, образи дисків і відновлення ПЗ).
- Бібліотеки віртуалізації (VHD-диски).
- Томи архівів SQL і Exchange.

Треба сказати, що рекомендації Microsoft часто суперечать один одному, тому не треба їх беззастережно приймати на віру. У кожному разі перед включенням дедуплікації необхідний ретельний аналіз.

Для визначення очікуваної економії в результаті включення дедуплікації можливо використовувати засіб оцінки дедуплікації Ddpeval.exe. Після установки компонента дедуплікації утиліта Ddpeval.exe автоматично встановлюється в папку \Windows\System32\. До речі, її можливо просто скопіювати з будь-якої установки Windows Server 2025 і запустити в системах Windows 10/11.

Синтаксис у програми простіше нікуди, пишемо Ddpeval.exe і вказуємо шлях. Як шлях можливо вказати локальний диск, папку або мережну кулі:

Ddpeval.exe E:

Ddpeval E:\Test\

Ddpeval.exe \\Server\Share

Програма видасть очікуваний розмір економії дискового простору, після чого вже можливо приймати рішення – включати дедуплікацію чи ні.

### **Системні вимоги**

Дедуплікація пред'являє до системи деякі вимоги.

#### **Тому**

- Тома, призначені для дедуплікації не повинні бути системними або завантажувальними. Дедуплікація не підтримується для томів операційної системи.
- Тома можуть бути розбиті під MBR або GPT і відформатовані в NTFS. Нова відказостійка файлова система ReFS не підтримується.
- Тома можуть перебувати на локальних дисках або в загальнодоступному сховищі (SAS, iSCSI або Fibre Channel).

– Windows повинна бачити томи як незнімні диски. Мережні диски й знімні носії не підтримуються.

– Не можливо включати дедуплікацію для загальних томів кластера (Cluster Shared Volume, CSV). Якщо дедуплікований том перетворити в CSV, то доступ до даних залишиться, але завдання дедуплікації не зможуть відробити.

#### **Апаратні ресурси**

– Устаткування серверів повинне відповідати мінімальним вимогам Windows Server 2025. Функція дедуплікації розроблена для підтримки мінімальних конфігурацій, таких як система з одним процесором, 4 ГБ ОЗУ й одним жорстким диском SATA.

– Сервер повинен мати одне процесорне ядро й 350 МБ вільної пам'яті для виконання завдання дедуплікації на одному томі, при цьому буде оброблятися близько 1,5 ТБ даних у день. Якщо планується підтримувати дедуплікацію в декількох томах на одному сервері, необхідно відповідним чином збільшити продуктивність системи, щоб гарантувати, що вона зможе обробляти дані.

– Функція дедуплікації підтримує одночасну обробку до 90 томів, однак при дедуплікації одночасно може оброблятися один том на фізичне процесорне ядро плюс один. Застосування технології Hyper-Threading не впливає на цей процес, оскільки для обробки тому можливо використовувати тільки фізичні ядра. Наприклад сервер з 16 процесорними ядрами й 90 томами буде обробляти по 17 томів одночасно, поки не обробить всі 90 томів.

– До віртуальних серверів застосовуються ті ж правила, що й до фізичного встаткування відносно ресурсів сервера.

#### **Загальні вимоги**

– Наявність вільного місця на диску. При відсутності дискового простору на дедуплікованому томі деякі додатки не зможуть одержати доступ до даних і будуть завершені з помилкою. Необхідно зберігати, принаймні, один гігабайт вільного місця на дедуплікованому томі.

– Тверді квоти. При використанні FSRM (File System Resource Manager) не підтримується установка твердих квот на обсяг тому. Коли для тому встановлені тверді квоти, фактичний обсяг вільного місця на томі й обмежене квотами простір відрізняється, що може привести до невдачі процесу дедуплікації. Всі інші FSRM-Квоти, у тому числі м'які квоти на обсяг тому й квоти на підпапки, будуть нормально працювати при дедуплікації.

– Файли з додатковими атрибутами, зашифровані файли, файли розміром менше 32 КБ і файли точок повторного аналізу при дедуплікації не обробляються.

Дедуплікація, по визначенню IDC, – це технологія створення з дублікатів єдиної копії даних з можливістю спільного доступу, що підвищує ефективність використання ємності систем зберігання. Згідно Microsoft, це процедура пошуку й видалення даних, що дублюються, без шкоди для їхньої якості й цілісності з метою зменшення обсягу простору, займаного даними.

Блоки, загальні для декількох файлів, зберігаються у вигляді однієї копії, тому вимоги до ємності зберігання всіх файлів знижуються. Видаляючи повторювані послідовності даних, дедуплікація дозволяє значно скоротити обсяг переданих і/або збережених даних. Щоб ще сильніше його зменшити, дедуплікацію нерідко сполучать із компресією (стиском), називаючи все це ущільненням даних.

При запиті файл збирається з відповідних блоків (для користувача або застосунку цей процес прозорий), тому, застосовуючи дедуплікацію до файлів, можливо не турбуватися про те, що робота застосунків ускладниться або доступ користувачів до файлів виявиться неможливий. Дедуплікація знижує витрати, зводячи до мінімуму накладні витрати на зберігання й передачу даних.

При використанні в системах резервного копіювання дедуплікація допомагає вирішити цілий ряд проблем і дає вагомні переваги.

Основні причини використання дедуплікації даних у системі резервного копіювання – невеликий розмір резервних копій, зниження потреби в ємності зберігання, скорочення

мережного трафіку, зменшення вікна резервного копіювання. Щодня виконуване повне резервне копіювання дозволяє гарантувати швидке відновлення за один крок.

У системах резервного копіювання з функцією дедуплікації можливі різні варіанти зберігання резервних копій: стрічкові накопичувачі й бібліотеки, віртуальні стрічкові бібліотеки, дискові масиви й системи зберігання даних, у тому числі з убудованою дедуплікацією. Дедуплікація виконується «на лету» (у процесі резервного копіювання або архівування), тому на диску, а також у хмарних сховищах (cloud backup) зберігаються вже дедупліковані дані.

Вимоги до ємності скорочуються в середньому 10-30 разів, значно підвищуються швидкість і надійність відновлення й добування даних. Але ніщо не дається даром: дедуплікація вимагає витрат. Потрібні обчислювальні ресурси, до того ж відбувається зниження продуктивності систем або збільшується їхня вартість. Тому потрібно з'ясувати, які витрати неминучі при використанні кожного методу.

Існують різні види, або методи, дедуплікації, у кожного свої переваги й недоліки.

Дедуплікація може виконуватися на джерелі даних або безпосередньо в сховище. Залежно від цього розподіляється обчислювальне навантаження. При першому методі дані обробляються на стороні клієнта й по закінченні дедуплікації пересилаються на пристрої зберігання. У результаті навантаження на мережу знижується, але на клієнтах доводиться встановлювати спеціалізоване ПЗ й оснащувати їх значними обчислювальними ресурсами.

Другий метод передбачає застосування могутнішої й дорогих СЗД, але витрати на первісну передачу даних фактично не знижуються. У кожному разі потрібно враховувати, що вимоги дедуплікації до ресурсів системи досить високі.

По даним Dell EMC, дедуплікація на джерелі дозволяє скоротити ємність зберігання до 50 разів, трафік – до 500 разів, час резервного копіювання – до 10 разів. Однак її ефективність дуже сильно залежить від типу даних. Очевидно, що найбільший ефект досягається, коли дані мають велику надмірність, а також коли копіюються й/або зберігаються після внесення незначних змін.

У загальному випадку для неструктурованих даних (файли документів, журналів, образів і віртуальних машин, електронної пошти й архівів) характерний високий коефіцієнт дедуплікації – їхній обсяг нерідко зменшується в 20–30 разів. Наприклад, добре дедуплікуються файли віртуальних машин (VHD): економія може становити до 90%. Дедуплікація структурованої інформації, наприклад баз даних, не настільки ефективна (звичайно до 5-8 разів).

Дедуплікація мультимедійних файлів теж не забезпечує великої економії. Зображення, відео (JPEG, GIF, TIF, MPEG, і ін.), результати стиску й шифрування, картографічні й сейсмічні дані, файли САПР – всі ці формати проблемні для дедуплікації.

Добре дедуплікуються рідко змінювані дані, оскільки постійний доступ до даних і їхній зміну можуть звести до мінімуму ефект дедуплікації. Microsoft не рекомендує застосовувати дедуплікацію до серверів Hyper-V, SQL і Exchange, файлам запущених віртуальних машин, більшим файлам (більше терабайта). Вона може функціонувати на файловому, блоковому або бітовому рівні.

У деяких схемах, заснованих на гешуванні, для підвищення коефіцієнта дедуплікації застосовується попередня обробка даних. Якщо дані обробляються на стороні клієнта, дедуплікація блоків змінної довжини дозволяє значно зменшити час резервного копіювання, тому що зберігаються тільки унікальні сегменти. Цей метод більше ефективний, чим традиційна дедуплікація сегментів фіксованої довжини, коли навіть невеликі зміни в наборі даних приводять до резервного копіювання всього файлу.

У системах резервного копіювання можуть використовуватися й інші методи дедуплікації. До того ж розроблювачі систем зберігання застосовують різні алгоритми дедуплікації, у тому числі досить складні, для яких потрібно більше процесорних ресурсів. Тому величина коефіцієнта дедуплікації залежить від реалізації цієї технології.

Сучасні рішення дають можливість створювати резервні копії даних у хмарі, що дозволяє надійно зберегти й відновити їх, визволивши час і ресурси.

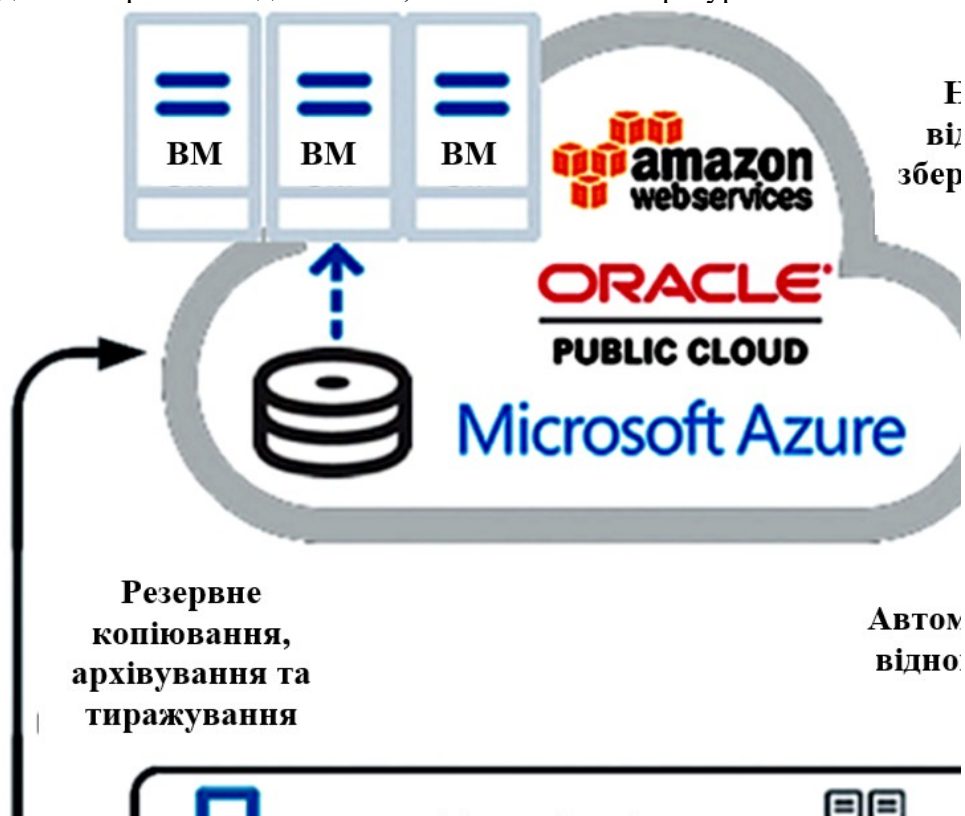


Рисунок 1 – Структурна схема системи

Вихідні дані можуть перебувати на будь-якій площадці: на стороні клієнта, в іншому комерційному ЦОДі або в хмарі. Таким чином, можливо швидко реалізувати переваги резервного копіювання даних у хмару, використовуючи його як розширення корпоративної ІТ-інфраструктури. У числі переваг такого рішення:

- швидке й надійне резервне копіювання, оперативне відновлення даних;
- відсутність необхідності в дорогих шлюзах і складних проміжних рішеннях;
- можливість замінити стрічкове сховище хмарним;
- використання хмари для аварійного відновлення.

Компанії все частіше застосовують комбінований підхід: дискові масиви в сполученні з копіюванням у хмару. Така стратегія зберігання резервних копій дозволяє прискорити резервне копіювання найбільш актуальних даних і знизити вартість володіння відповідною інфраструктурою резервного копіювання. Використання дедуплікації дає можливість не тільки оптимізувати займану резервними копіями ємність сховищ, але й зменшити мережний трафік при резервуванні в хмару, що робить цю технологію ще більш актуальною.

Постійний розвиток і інтеграція рішень дедуплікації даних розроблявачами систем резервного копіювання й виробниками систем зберігання буде сприяти більшій економічності пропонувананих рішень, зниженню вартості впровадження, більше швидкому переміщенню резервних копій між територіально віддаленими площадками.

**Висновки.** У статті наведені теоретичне узагальнення й рішення наукового завдання дослідження методів дедуплікації в інфраструктурі резервного копіювання. Рішення даного завдання полягало у вирішенні наступних задач:

- Був проведений огляд існуючих систем дедуплікації в інфраструктурі резервного копіювання.
- Досліджена система дедуплікації в інфраструктурі резервного копіювання.

– На основі отриманих результатів досліджень створена програмна реалізація системи дедуплікації в інфраструктурі резервного копіювання. Розроблені алгоритми дозволяють успішно вирішувати завдання дедуплікації в інфраструктурі резервного копіювання. 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. Kuznetsov, O., Kryvinska, N., Ilchenko, O., Smirnova, T., Ulianovska, Y. «Comparative Analysis of Cryptocurrency Trading Platforms Using the Analytic Hierarchy Process». CEUR Workshop Proceedings, 2023, 3628, pp. 106-115.
2. 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.
3. Smirnov, O., Sydorenko, V., Aleksander, M., Zhyharevych, O., Yenchey, S. «Simulation of the cloud IoT-based monitoring system for critical infrastructures». CEUR Workshop Proceedings, Volume 3530, 2023, pp. 256-265.
4. 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.
5. 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.
6. 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.
7. 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.
8. 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.
9. 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.
10. 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.
11. 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.
12. Smirnov O., Kuznetsov A., Kiiian A., Kuznetsova T. «Non-binary constant weight coding technique». CEUR Workshop Proceedings. Volume 2740, 2020, Pages 102-114.
13. 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.
14. Smirnov O., Kuznetsov A., Kiiian 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.
15. 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.
16. 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.
17. 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.

18. 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.
19. 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.
20. 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.
21. 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.
22. 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.
23. 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.
24. 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.
25. 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.
26. 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.
27. 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.
28. 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.
29. 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
30. 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.
31. 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.