

УДК 004

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

## ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ПРИНЦИПИ ПОБУДОВИ СИСТЕМИ ПОБУДОВИ ПРОГРАМУЄМОЇ МЕРЕЖІ SDN НА БАЗІ SD-WAN

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

**SDN, SD-WAN**

**Постановка проблеми.** Перехід до програмувальних мереж SDN останні п'ять років перебуває у фокусі уваги основних постачальників і замовників продуктів для мережних інфраструктур, поки ця технологія більш-менш активно використовується тільки в одному сегменті – у мережах центрів обробки даних.

Програмно-конфігуруєма мережа (SDN від англ. Software-defined Networking, також програмно-визначаєма мережа) – мережа передачі даних, у якій рівень керування мережею відділений від пристроїв передачі даних і реалізується програмно, одна з форм віртуалізації обчислювальних ресурсів.

Давайте розшифруємо це визначення. Якщо розглянути сучасний мережний пристрій (роутер або комутатор, не принципово), то він логічно складається із трьох компонентів.

1. Рівень керування – це CLI, убудований веб-сервер або API і протоколи керування. Завдання цього рівня забезпечити керуваність пристроєм.

2. Рівень керування трафіком – це різні алгоритми й функціонал завданням якого є автоматична реакція на зміни трафіку тобто інтелект пристрою.

3. Передача трафіку – функціонал який забезпечує фізичну передачу даних, рівень мікросхем і мережних пакетів.

Що якщо:

– централізувати керування трафіком, відокремивши керування від пристроїв?

– централізувати керування пристроями?

У результаті «новий» роутер або комутатор обслуговує тільки потік даних (рівень передачі трафіку DATA PLANE), ставати більше простим відповідно до більше дешевих. Звичайно ж позбавити повністю інтелекту мережний пристрій не вийде, але його досить замінити простою таблицею переадресації (forwarding table).

SD-WAN – це архітектура, в основі якої лежить принцип пріоритетної реалізації хмарних рішень, що розділяє площини даних і керування, керовані через консоль. Можливо швидко створити оверлейну фабрику SD-WAN для підключення центра обробки даних, філій, комплексів будинків і центрів спільного розміщення ресурсів для підвищення швидкості, безпеки й ефективності мережі.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** При аналізі останніх досліджень і публікацій [1-30] було виявлено певні прогалини у забезпеченні системи побудови програмуємої мережі sdn на базі SD-WAN.

**Мета й завдання дослідження.** Метою роботи є дослідження та принципи побудови системи побудови програмуємої мережі SDN на базі SD-WAN.

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

- Огляд існуючих систем побудови програмуємої мережі SDN на базі SD-WAN.
- Дослідження системи побудови програмуємої мережі SDN на базі SD-WAN.
- Програмна реалізація системи побудови програмуємої мережі SDN на базі SD-WAN.

*Об'єктом дослідження* є процес побудови програмуємої мережі SDN на базі SD-WAN.

*Предметом дослідження* є методи побудови програмуємої мережі SDN на базі SD-WAN.

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

**Виклад основного матеріалу.** SDN – програмно-визначаєма мережа. Перевага даної технології в тому, що SDN допомагає управляти мережею саме на програмному рівні. А це значить, що ІТ-фахівцям більше немає необхідності вручну налагоджувати роботу або змінювати налаштування мережного устаткування й, таким чином, витратити масу часу. Усе робиться в автоматичному режимі із застосуванням інтелектуальних алгоритмів керування. Яку вигоду при цьому одержує бізнес? Це – досягнення максимальної ефективності при керуванні мережею: скорочення витрат на її експлуатацію, підвищення надійності роботи й швидкості відгуку бізнес-додатків, забезпечення мережної безпеки, підвищення швидкості запуску на ринок нових сервісів і послуг. І все це доступно відразу завдяки переходу на програмно-визначаєме рішення.

Зараз SDN активно застосовується в центрах обробки даних, тому що без цієї технології вже не можна реалізувати ні одного завдання по віртуалізації Ікт-інфраструктури дати-центра. Крім цього, SDN використовується з метою модернізації транспортної телеком-інфраструктури компаній зі складними розподіленими мережами передачі даних. Є також і спеціалізована технологія SD-WAN, що у першу чергу цікава компаніям з більшою кількістю філій – фінансовим установам, ритейлу, промисловим і добувним підприємствам і т.д. У цьому випадку SD-WAN дозволяє відмовитися від дорогих VPN-каналів зв'язку від телеком-операторів, для роботи досить звичайного інтернет-з'єднання й LTE, наприклад, як резервного. Технологія дозволяє автоматично розподіляти трафік у мережі передачі даних і відправляти його по найбільш дешевому й незавантаженому в даний момент каналу без втрати швидкості і якості роботи додатків. SD-WAN уже завойовує американський і європейський ринок, в Україні дана технологія ще тільки починає розвиватися. Отже, SDN можна умовно розділити на три групи:

- SDN для ЦОДів;
- транспортний SDN;
- окрема технологія SD-WAN для побудови територіально-розподілених мереж.

У кожного свої особливості й переваги для бізнесу.

Як я вже говорив, різні типи SDN вирішують різні завдання. Доцільність впровадження SDN у дата-центрах уже давно доведена на практиці. Що стосується SDN у транспортній інфраструктурі, те це рішення цікаво переважно провайдерам зв'язку. З його допомогою можна істотно скорочувати витрати на ІТ і при цьому прискорювати процес Time-to-Market, тобто виводу ІТ-сервісів для клієнтів на ринок. Оптимізація витрат досягається за рахунок зниження CAPEX і OPEX, оскільки SDN відразу легко «подружити» практично з будь-яким мережним устаткуванням на відміну від класичних дорогих моновендорних рішень.

От вам конкретний приклад. Модель операторського бізнесу міняється, гравці ринку змушені швидше запускати нові сервіси для користувачів, щоб, з одного боку, забезпечити необхідний рівень виторгу, з іншої, підвищити рівень лояльності абонентів. Не секрет, що вартість класичних послуг, будь то голос, смс, інтернет, стрімко падає, а для того, щоб їх робити, необхідно підтримувати дорогу інфраструктуру. Більше того, нові сервіси вимагають технологічно грамотного налаштування, забезпечення необхідного рівня безпеки й іншого.

Виникає питання – як це можна зробити оперативно в більших територіально-розподілених мережах операторів? Це непросто навіть із управлінської точки зору. Тільки представте, послуга впроваджується в дата-центрі, потім «попадає» у транспортну мережу й по ній уже доставляється до кінцевого устаткування. За кожний з етапів відповідає певна група технічних фахівців, що працює строго в рамках своєї компетенції. А це значить, що при підключенні нового сервісу абонентів починається передача заявок між відділами – іншими словами, бюрократія. При цьому клієнти стають усе більше розпеченими, нетерплячими. Вони хочуть скористатися послугою миттєво, буквально нажавши пару кнопок на телефоні. От це завдання – максимально швидко запустити новий сервіс для абонента – і допомагає вирішувати SDN.

У корпоративному сегменті, як я вже говорив раніше, усе в більшій кількості ЦОДів впроваджується SDN-технологія. Важливо, що вона застосовна як при будівництві нових ЦОД, так і при модернізації існуючих. Що стосується транспортних мереж, те тут програмно-визначаємі мережі розвиваються повільніше, ніж у телекомі, тому що для Enterprise мережі не є ключовим бізнесом. Плюс корпоративні сервіси для кінцевих клієнтів розвиваються не так швидко, як хотілося б. Транспортної мережі приділяють менше увагу, на її модернізацію витрачають менше грошей.

При цьому, якщо говорити про SD-WAN, то ситуація є трохи інакшою, тому що на перше місце тут виходить не економія на обслуговуванні устаткування, а економія на каналах зв'язку й швидкість підключення нових філій.

Рішення SD-WAN допомагає компаніям замінити або доповнювати оренду мереж VPN в операторів зв'язку. Звичайна побудова класичної телекомунікаційної інфраструктури розподіленої компанії виглядає в такий спосіб. Є головний офіс і трохи регіональних, які потрібно об'єднати в єдиний інформаційний простір, дотримати якості надання сервісу й вимоги безпеки. Компанія повідомляє тендер, у якому беруть участь оператори зв'язку. При цьому, по-перше, вартість каналу зв'язку від оператора значно перевищує вартість звичайного інтернет-з'єднання, по-друге, компанії, для яких критично важлива доступність сервісів для клієнтів, замовляють резервний канал у другого оператора зв'язку. Поверх цього замовник повинен вибудувати свою телекомунікаційну мережу, що складається з маршрутизаторів, мережних пристроїв і міжмережєвих екранів. І тільки потім Ікт-інфраструктуру можна експлуатувати. Іноді виникають ситуації, коли оператор зв'язку не обслуговує район, у якому розміщений філія. Тоді завдання по підключенню вирішується нетиповими методами – добре, якщо це прокладка оптоволокну або оренда останньої милі, і гірше, якщо радіорелейне устаткування або той же модем LTE. Все це істотно позначається на строках запуску нових офісів і вартості каналів зв'язку.

Для того, щоб скоротити витрати, і застосовується технологія SD-WAN. Розповім небагато про технічну частину. Роботу програмно-визначаємої розподіленої мережі WAN забезпечує «розумний» контролер у ЦОДі головного офісу, на якому встановлене спеціалізоване ПЗ. До комутатора можна прямо підключати основний і резервний канали доступу в інтернет. При цьому ПЗ саме робить балансування каналів зв'язку, домагаючись порівнянної якості передачі даних. Контролер також виконує функції кінцевого роутера, на якому створюється приватна мережа. Плюс на контролер встановлюються додатки, що контролюють безпеку й прозорість роботи мережі. Повний комплекс в одній «залізці» у головному офісі й підключаються до цього контролера набагато менш «розумні», а, отже, недорогі, комутатори у філіях.

Будь-яка компанія може відмовитися або, як мінімум, оптимізувати дорогі контракти з операторами зв'язку, мінімізувати кількість устаткування у своїх офісах, здійснювати керування офісами через єдиний інтерфейс. SD-WAN – це ефективний інструмент для перекладу витрат з CAPEX в OPEX.

Більше того, SD-WAN не вимагає особливих знань для його інсталяції. Особливо це важливо для віддалених філій, де може просто не бути власного штату ІТ-фахівців. На ринку є «коробкові» пропозиції, у рамках яких SD-WAN устаткування доставляють клієнтови поштою або кур'єром. Будь-який співробітник, не обов'язково ІТ-фахівець, здатний зрозуміти й виконати інструкцію виду «взьміть комутатор і два кабелі, один підключите до порту 1, іншої – до порту 2». Більше нічого не потрібно – пристрій саме зв'язується із центральним сервером, одержує всі конфігурації, настроюється, і цей офіс стає частиною захищеної мережі компанії. Як результат – зовсім інші бюджет і строки. У світі вже є дуже багато кейсів впровадження SD-WAN, наприклад, це мережі магазинів Car і Tata Group. Потреба даної технології підтверджується великими аналітичними компаніями, зокрема, Gartner прогнозує SD-WAN підричний ріст у найближчі два роки.

Україна традиційно переймає західні технології із затримкою в кілька років, поки ми небагато менш просунуті в цьому питанні. Чому так відбувається? Спробу пояснити.

Більшість рішень по віртуалізації за кордоном будується на вільному ПЗ. Співтовариство розроблювачів має потребу в інвестиціях. У частині SDN такими лідерами-інвесторами виступають великі світові оператори зв'язку, а також ІТ-компанії, які не бажають переплачувати вендорам за пропріетарні рішення й бути прив'язаними до продуктових лінійок розроблювачів, тому що це позбавляє їхній бізнес гнучкості. Всі вони готові вкладатися в створення нових продуктів і тримати штат R&D-розроблювачів. Результатом стають повноцінні комплексні рішення, які ідеально підходять під бізнес стільникових операторів і компаній з Enterprise сегмента – вони дійсно на всіх рівнях керування зацікавлені у віртуалізації інфраструктури.

В Україні ж у першу чергу виникає питання, хто буде відповідати за впровадження цього комплексного рішення в рамках компанії, частиною якого є SDN. Адже віртуалізація мереж передачі даних вимагає зміни не тільки технологічного, але й організаційного підходу.

Розвиток власних апаратних елементів, на жаль, іде дуже повільно в Україні, у зв'язку із чим програмні рішення оптимізовані для роботи на чипах іноземного виробництва: Intel, Broadcom, Qualcomm. Із софтом ситуація краще. Українські рішення досить конкурентоспроможні. Є кілька українських компаній, які показують непогані результати в частині SDN розробок.

Важливо відзначити, що рішення SD-WAN може бути впроваджене як у замовника, так і надаватися як керований сервіс. У цьому випадку за розвиток, керування й технічну підтримку Ікт-інфраструктури повністю відповідають фахівці системного інтегратора. У рамках сервісу замовник одержує гарантію безперервності роботи мережі передачі даних філій і при цьому заощаджує на змісті телеком-інфраструктури – переводить капітальні витрати в операційні.

Якщо говорити про конкретні цифри економії, то однакових показників ми не знайдемо навіть у межах однієї галузі, тому що в Україні поки проектів мало, а на Заході зовсім інші умови – наприклад, в операторів зв'язку значно відрізняється ARPU – прибутковість від кожного абонента. Орієнтовно можна сказати, що в наших проектах для телеком-операторів економія досягає 20-30%. З огляду на масштаби бізнесу великих провайдерів, потрібно визнати, що це досить серйозний аргумент на користь руху у бік SDN.

Навіщо потрібний новий підхід до побудови територіально розподілених мереж? Відповідаючи на це питання, вказується на підвищення складності таких мереж, що утрудняє їхнє обслуговування й розвиток, пошук несправностей, забезпечення безпеки й вимагає залучення висококваліфікованих (читай, дорогих) фахівців служби експлуатації та ін. Підхід SD-WAN покликаний спростити рішення цих завдань.

Пояснюючи суть технології SD-WAN, можна сказати наступне: якщо раніше для підключення нової філії до корпоративної мережі могли знадобитися тижні й місяці, те зараз досить відправити пристрій у філію й просто підключити його до мережі: автоматично будуть зроблені весь необхідні налаштування й підключені всі необхідні мережні сервіси. Сучасні рішення SD-WAN дозволяють автоматично визначити, через який тип підключення потрібно маршрутизувати трафік даного додатка – приватний канал зв'язку, Інтернет або мережа стільникового зв'язку. Це дозволить знизити навантаження на дорогі канали зв'язку й використовувати мережу Інтернет для передачі некритичного трафіку.

Рішення SD-WAN автоматично виявляють несправність на каналі зв'язку (або погіршення його характеристик) і автоматично ж переводять трафік на інші канали. При цьому ніякого розриву сеансу зв'язку не відбувається й користувач додатка нічого не зауважує. Для підвищення якості роботи певних додатків, наприклад сеансу голосовий або відеозв'язку, їх трафік може дублюватися по декількох каналах, тоді на пристрої-приймачі будуть вибиратися пакети, які в цей момент часу доставлені з мінімальною втратою й затримкою. Інший можливий варіант – балансування однієї сесії між декількома каналами, що дозволяє задіяти більшу транспортну «трубу», скажемо, при зкачуванні більших файлів.

#### **Тонке регулювання**

Рішення SD-WAN – це повноцінні маршрутизатори з функціями забезпечення безпеки, глибокого аналізу трафіку (DPI), балансування трафіку та ін. Рішення здатне ідентифікувати трафік більше 4000 додатків, що дає широкі можливості для регулювання їхнього використання. Наприклад, можна блокувати можливість перегляду Facebook, дозволивши при цьому користуватися месенджером, щоб віддалені колеги могли взаємодіяти між собою. Або, навпаки, блокувати месенджер, залишивши можливість переглядати новини Facebook.

Рішення SD-WAN здатні «розбирати» закритий трафік цих систем і оптимальним образом використовувати всі наявні канали для їхньої доставки.

Як контролер керування мережі SD-WAN виступає SD-WAN Center. Ця віртуальна машина, що поставляється в комплекті з іншими продуктами SD-WAN, забезпечує централізоване адміністрування й керування, а також збір інформації з конфігурації, нагромадження різних звітів (наприклад, по виконанню SLA) та ін. Як і покладено системі SD-WAN, рішення Citrix реалізує принцип автоматичного розгортання (zero touch deployment): досить підключити доставлене у філію пристрій, і конфігураційні параметри будуть автоматично завантажені й активовані.

#### **Коли важлива безпека**

Важливе, а для багатьох замовників ключова перевага SD-WAN – підвищення мережної безпеки. Не дивно, що реалізовано підтримку SD-WAN на базі наявних продуктів, що формують так звану фабрику безпеки для комплексного рішення завдань ІБ. До складу рішення SD-WAN входять міжмережеві екрани, засоби організації бездротових локальних мереж, а також системи централізованого керування й аналітики.



Рисунок 1 – Структурна схема системи

Для реалізації розширених функцій SD-WAN використовуються власні процесори безпеки, застосування яких прискорює виконання завдань, зв'язаних безпосередньо з безпекою й забезпеченням мережними підключеннями. Оптимізована архітектура підтримує реалізацію функцій глибокого аналізу й інспекції трафіку.

Відповідно до останнього звіту про дослідження погроз, частка зашифрованого трафіку становить більше 50% від загального обсягу корпоративного трафіку. Це утрудняє моніторинг і аналіз трафіку, а також знижує ефективність маршрутизації мереж SD-WAN. Як розширені функції SD-WAN підтримують застосування дозволених шифрів SSL і забезпечують найвищу у своєму класі пропускну здатність при інспекції SSL, що гарантує безпечну й ефективну доставку зашифрованого трафіку.

Сьогодні забезпечення інформаційної безпеки вимагає нового підходу, якому можна реалізувати, використовуючи комплексні рішення безпеки, інтегровані в мережну інфраструктуру. Серед причин, що ускладнюють рішення завдань мережної безпеки, – ріст числа підключених пристроїв, у тому числі завдяки розвитку Інтернету речей, розмивання границь мереж, уже згадане підвищення частки зашифрованого трафіку й ін. Відповіддю на нові виклики й стала «фабрика безпеки», до складу якої входить комплекс різних продуктів.

Кожний вендор розуміє SD-WAN так, як це йому вигідно, щоб рішення SD-WAN краще корелювало з його лінійкою продуктів. Фахівці виділяють два підходи до реалізації концепції SD-WAN.

При першому підході встановлюване у філії пристрій SD-WAN наділяється максимальним числом функцій, включаючи DPI, просунуті функції безпеки, шифрування та ін. Головний недолік цього підходу – висока вартість таких пристроїв, що може віджахнути багатьох замовників. Крім того, у цьому випадку обмежена можливість керування мережними функціями (сервісами), оскільки вони «прошиті» у кінцевих пристроях.

Другий підхід – коли всі сервіси виносяться в хмару (ЦОД), а в клієнта встановлюється дуже просте (недороге) пристрій. Його завдання зводяться до маркування трафіку і його пробросу (наприклад, по каналі IPsec) до ЦОДу. Крім істотного зниження вартості пристроїв, даний підхід вирішує завдання гнучкого керування сервісами. Але виникає інша проблема, пов'язана з каналами зв'язку. Ряд сервісів висувають досить високі вимоги до пропускну здатності таких каналів, величині затримки та ін.

Єдиного універсального рішення SD-WAN, здатного оптимально вирішити всі завдання, просто не існує. Тому треба шукати компроміс, а можливо, іти по шляху гібридного підходу, що сполучить перший з розглянутих варіантів із другим.

### Керування із хмари

Існує хмарна система керування мережною інфраструктурою, що служить для роботи з мережами, побудованими на основі провідних і бездротових пристроїв.

Система підтримує бездротові крапки доступу, маршрутизатори, апаратні міжмережеві екрани й інші пристрої. Система в реальному часі збирає й видає на один екран різні дані: статистику по трафіку, інформацію про стан пристроїв, розташуванні сегмента мережі, його завантаженості та ін. Вся ця інформація доступна через Web-інтерфейс на комп'ютері, планшеті й смартфоні оператора. Система дозволяє не тільки одночасно управляти декількома віддаленими сегментами мережі, але й зберігати й швидко завантажувати налаштування при запуску нового сегмента. За допомогою мобільного додатка монтажникові досить відсканувати QR-код на кришці підключеного до мережі пристрою, і воно буде автоматично зареєстроване й настроєне для роботи.

Більшість компаній, які продають устаткування, одержують більшу частину свого доходу, надаючи послуги інсталяції й післяпродажної підтримки. Підхід Cloud Networking може допомогти перейти від продажів продуктів до продажів рішень і сервісів з постійним доходом.

**Висновки.** У статті наведені теоретичне узагальнення й рішення наукового завдання дослідження методів побудови програмуємої мережі SDN на базі SD-WAN. Рішення даного завдання полягало у вирішенні наступних задач:

- Був проведений огляд існуючих систем побудови програмуємої мережі SDN на базі SD-WAN.
- Досліджена система побудови програмуємої мережі SDN на базі SD-WAN.
- На основі отриманих результатів досліджень створена програмна реалізація системи побудови програмуємої мережі SDN на базі SD-WAN.

Розроблені алгоритми дозволяють успішно вирішувати завдання побудови програмуємої мережі SDN на базі SD-WAN. 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., Yanchev, 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., Kiian 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., 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.
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.