

УДК 004

Я.Скібінський, магістр гр. КІ-23М*Центральноукраїнський національний технічний університет*

ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ СИСТЕМИ ІНТЕГРАЦІЇ МЕРЕЖНИХ СЕРВІСІВ НА ОСНОВІ ТЕХНОЛОГІЇ ACI

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

Постановка проблеми. Cisco ACI – це рішення SDN, яке визначає мережеву інфраструктуру на основі мережевих політик. Щоб зробити це можливим, Cisco створила ОС ACI Fabric, яка працює на всіх системах у мережі ACI. Ця спільна ОС дає змогу різним комутаторам у мережі ACI перетворювати політики в проекти інфраструктури. Центр обробки даних ACI – інфраструктура, орієнтована на застосування. ACI складається з ключових компонентів, які працюють разом, щоб забезпечити його функціональність, що дозволяє адміністраторам легко керувати своєю мережевою інфраструктурою.

- Контролер інфраструктури політики застосування (APIC) діє як централізований контролер керування та політики для всієї вашої IT-інфраструктури.

- Комутатори Spine встановлюють швидке з'єднання між кінцевими комутаторами, які відповідають за підключення серверів і кінцевих точок до структури ACI.

- Профілі мережі додатків (ANP) містять параметри підключення до мережі, політики безпеки та якості обслуговування (QoS) для певних програм або груп.

- Кінцеві точки включають фізичні або віртуальні сервери, віртуальні машини або пристрої, підключені до мережі ACI.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. При аналізі останніх досліджень і публікацій [1-10] було виявлено певні прогалини у забезпеченні системи інтеграції мережних сервісів на основі технології ACI.

Мета й завдання дослідження. Метою роботи є дослідження та програмна реалізація системи інтеграції мережних сервісів на основі технології ACI.

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

- Огляд існуючих систем інтеграції мережних сервісів на основі технології ACI.
- Дослідження системи інтеграції мережних сервісів на основі технології ACI.
- Програмна реалізація системи інтеграції мережних сервісів на основі технології

ACI.

Об'єктом дослідження є процес інтеграції мережних сервісів на основі технології ACI.

Предметом дослідження є методи інтеграції мережних сервісів на основі технології ACI.

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

Виклад основного матеріалу. Мережа розроблювачів Cisco для ACI

Спрощення швидкої інтеграції й налаштування систем для розгортання мережних сервісів, спостереження, керування й координації.

ACI: відповідь на мінливу ситуацію

Зміни в галузі викликають зміна підходу до IT на всіх рівнях. Моделі використання власних IT-ресурсів замінюються моделями використання хмарних сервісів. Концепція «IT як послуга» (ITaaS) витісняється концепцією «додатка як послуга». Замість роздільної розробки й експлуатації популярність набирає інтегрована розробка й експлуатація (DevOps). Моделі керування, орієнтовані на пристрої, замінюються моделями керування, орієнтованими на додатки.

Для адаптивності бізнесу потрібна швидка адаптація додатків, тому IT-фахівці повинні надавати доступ до додатків за кілька годин, а не місяців. Збільшення або зменшення обсягу використовуваних ресурсів необхідно виконувати протягом декількох хвилин, а не годин.

Традиційні підходи розглядають розрізнені аспекти експлуатації й не передбачають активної взаємодії між відділами, відповідальними за додатки, мережі, безпеку й хмарні сервіси. Загальна операційна модель забезпечує швидкість адаптації додатків, спрощення експлуатації, високу продуктивність і можливість масштабування.

Рішення: підхід до керування інфраструктурою, орієнтований на додатки

Інфраструктура, орієнтована на додатки (ACI), надає цілісну архітектуру із централізованою автоматизацією й профілями додатків на основі політик. ACI забезпечує гнучкість програмного забезпечення й масштабованість апаратної продуктивності.

Компоненти Cisco ACI:

- нові комутатори Cisco Nexus серії 9000;
- централізоване керування політиками й контролер Cisco APIC (Application Policy Infrastructure Controller);
- віртуальний комутатор додатків Cisco AVS для периметра віртуальної мережі;
- інноваційні програмні й апаратні технології;
- інтегрована фізична й віртуальна інфраструктура;
- відкрита система постачальників рішень для організації мережі, зберігання, керування й координації.

Основні характеристики ACI:

- спрощення автоматизації за рахунок моделі застосування політик на основі додатка;
- централізований контроль зі спостереженням за працездатністю додатків у режимі реального часу;
- відкрите програмне забезпечення для гнучкої інтеграції із групами DevOps і партнерами по системі;
- масштабування продуктивності й багатокористувальницький режим устаткування.

Майбутнє мереж ACI полягає в реалізації такого підходу до розгортання мережі, спостереженню за мережею й керуванню мережею, який би підтримував DevOps і швидку зміну додатків. Для досягнення цих цілей ACI зменшує складність і використовує загальну структуру політик, що дозволяє автоматизувати виділення ресурсів і керування ними.

ACI є інноваційною, безпечною архітектурою, що заснована на цілому ряді різних елементів. Нижче наведено короткий опис цих елементів.

Матриця комутації, орієнтована на додатки

Об'єднання встаткування, програмного забезпечення й нових технологій ASIC для реалізації інтегрованого системного підходу, що дозволяє задіяти стандартні протоколи Ethernet і IP.

Розширювана, об'єктно-орієнтована ОС пропонує великі можливості програмування.

Оцінки стану, лічильники й політики на рівні додатків (як фізичних, так і віртуальних) спрощують усунення неполадок і забезпечують можливість контролю.

Централізоване керування, автоматизація й координація

Загальна структура керування для відділів керування мережами, додатками, безпекою й віртуалізацією підвищує адаптивність ІТ-системи.

АСІ автоматизує всі завдання керування матрицею комутації, включаючи керування образами, настроювання й погоджування з іншими мережними сервісами інфраструктури, такими як міжмережні екрани й сервіси балансування навантаження.

Оптимізація змішаного робочого навантаження й міграції для будь-якого додатка, у будь-якій точці, у будь-який час

Спрощення надання доступу до додатків при одночасному посиленні кореляції продуктивності й контролю між логічними й фізичними мережами.

Упорядкування переносу фізичних і віртуальних серверів між різними гіпервізорами й фізичними серверами для спрощення міграції з віртуального рівня на фізичний або з одного віртуального рівня на інший.

Безпечне багатокористувальницьке середовище

Надійна ізоляція, що попереджає, і дотримання угод про рівень обслуговування для різних користувачів при одночасному послідовному застосуванні політик безпеки у фізичних і віртуальних додатках.

Співробітники центра обробки даних задають політики безпеки й мережних політиків, використовуючи єдину абстрактну мову. Завдяки цьому відділи забезпечення безпеки можуть виконувати надійне завдання політик незалежно від топології мережі.

Можливості розширення й відкритість

АСІ використовує відкриті API-інтерфейси, відкритий вихідний код і відкриті стандарти, підтримуючи стратегію Cisco Open Network Environment (ONE). Це забезпечує найширший вибір елементів керування центрами обробки даних і інфраструктури.

Набір добре документованих API-інтерфейсів до вищестоящих і нижчестоящих систем, надаваний через мережу розроблювачів Cisco, спрощує швидку інтеграцію системи й підвищує гнучкість наступних елементів:

- сервіси рівнів 4-7;
- інфраструктура віртуальної мережі;
- моніторинг;
- керування;
- послуги координації.

Захист капіталовкладень – людські ресурси й інфраструктура

Задійте існуючу інфраструктуру й навички вже притягнутих ІТ-фахівців для зниження сукупної вартості володіння.

Інноваційний оптичний модуль двонаправленої передачі зі швидкістю 40 Гбіт/с дозволяє використовувати існуючу проводку 10 Гбіт/с для скорочення дорогої модернізації волоконно-оптичної мережі.

Замовники можуть розгорнути комутатори Cisco Nexus серії 9000 в автономному режимі або перейти на матриці комутації стандарту ACI, виконавши відновлення програмного забезпечення. Такий підхід у сполученні з відкритими інтерфейсами для підтримки існуючої інфраструктури забезпечує захист капіталовкладень для всього сімейства продуктів.

АСІ забезпечує адаптивне розгортання додатків на підприємствах і в організаціях постачальників послуг. Лежача в її основі матриця комутації забезпечує дистанційний контроль, ефективність, масштабованість і облік особливостей додатків, що приводить до зниження сукупної вартості володіння. Центри обробки даних наступного покоління буде будуватися на принципах ACI, які розраховані на вимоги поточних і майбутніх додатків.

Продукти

Комутатори Cisco Nexus серії 9000 містять інноваційні технології для забезпечення кращої в галузі продуктивності, потужності, щільності портів і можливостей програмування. Сімейство включає наступні пристрої:

- Cisco Nexus 9396PX;
- Cisco Nexus 93128TX;
- Cisco Nexus 9508.

Віртуальний комутатор додатків Cisco AVS надає погоджену інфраструктуру віртуального комутатора між матрицями комутації ACI і віртуальним комутатором Cisco Nexus 1000V для існуючих матриць комутації ЦОД.

Контролер Cisco APIC (Application Policy Infrastructure Controller) забезпечує програмну автоматизацію виділення мережних ресурсів і керування на основі вимог додатків і політик.

Система захисту інфраструктури Cisco, орієнтованої на додатки, для центрів обробки даних спрощує середовище замовника. Система захисту ACI розглядає міжмережні екрани як єдиний пул ресурсів і забезпечує їхнє інтелектуальне об'єднання відповідно до мережних політиків додатка. Система захисту ACI забезпечує динамічне прискорення встаткування й інтегрується безпосередньо в ACI.

Послуги, надавані компанією Cisco і нашими сертифікованими партнерами, приносять замовникам відчутну вигоду, таку як прискорення окупності на 15-20 %, зниження витрат на інфраструктуру на 30 %, прискорення аварійного відновлення на 50 % і скорочення часу розгортання на 90 %.

Послуги Cisco для ACI

Послуги розробки бізнес-стратегії Cisco включають підготовку економічного обґрунтування й генерального плану для впровадження інфраструктури, орієнтованої на додатки.

Послуги підготовки й планування Cisco забезпечують перетворення центрів обробки даних з використанням інфраструктури, орієнтованої на додатки.

Послуга швидкого розгортання Cisco для Nexus 9000 включає консультації по розгортанню.

Послуги прискореного розгортання Cisco для Nexus 9000 допомагають виконати швидкий перехід до архітектури, орієнтованої на додатки.

Послуги підготовки до експлуатації Cisco для центрів обробки даних забезпечують підготовку середовища до впровадження ACI, розглядаючи всі етапи її життєвого циклу.

Підтримка продуктів Cisco для програмних і апаратних рішень, пов'язаних з Cisco Nexus 9000, надається по усьому світі цілодобово й без вихідних. Розширена підтримка Cisco також включає Cisco SMARTnet або Cisco Smart Net Total Care*.

Послуги Cisco для захисту інфраструктури центра обробки даних

Послуга оцінки архітектури безпеки центра обробки даних Cisco допомагає проаналізувати інфраструктуру безпеки і її відповідність політиці безпеки.

Послуга з переносу пристроїв Cisco ASA для захисту центра обробки даних допомагає виконати перенос сторонньої платформи або багатофункціонального пристрою захисту Cisco ASA, включаючи конфігурації й правила міжмережних екранів, у віртуалізоване середовище.

Розробка структурної схеми

Апаратна платформа «відкритого комутатора» може будуватися як на типових наборах мікросхем таких компаній, як Broadcom, Intel, Marvell і Mellanox, так і на стандартній архітектурі x86. Сервери x86, як правило, використовуються для підтримки віртуальних комутаторів, які споконвічно створювалися для комутації трафіку віртуальних машин усередині сервера й обміну трафіком із зовнішньою мережею. Найвідоміший віртуальний комутатор з відкритим вихідним кодом – Open vSwitch, він може функціонувати

як автономно, у режимі традиційного комутатора (з формуванням таблиць комутації шляхом вивчення MAC-Адрес), так і під керуванням зовнішнього контролера SDN. Крім Open vSwitch, існують і інші рішення, наприклад Lagopus, а також комерційні віртуальні комутатори від Cisco, VMware і ін.

Останнім часом платформа x86 усе ширше використовується для побудови фізичних комутаторів, націлених на комутацію великої кількості зовнішніх потоків. Для цього застосовуються традиційні сервери Intel з більшим числом мережних інтерфейсів разом із уже згаданим Open vSwitch або, наприклад, Lagopus. При цьому вживають спеціальні міри для підвищення продуктивності таких комутаторів. Наприклад, Центр прикладних досліджень комп'ютерних мереж (ЦПДКС) разом з Intel розробили рішення, що до 10 разів підвищує продуктивність комутатора Open vSwitch. Воно реалізовано за допомогою набору бібліотек і драйверів Intel Data Plane Development Kit (DPDK), що забезпечує швидку обробку пакетів на платформах Intel. Зокрема, це рішення не вимагає переривань процесора для копіювання пакетів в оперативну пам'ять.

Як нас повідомили в ЦПДКС, комутатори на базі серверів x86 українського складання, у тому числі з підтримкою до 32 портів 10 Gb, уже тестуються українськими замовниками. Правда, рішення на 32 порту 10 Gb поки не є повністю заблокованим. При цьому спеціалізовані рішення, наприклад на основі наборів мікросхем Broadcom і Mellanox, уже забезпечують заблоковану роботу комутатора з 32 портами 100 Gb. Так що в плані продуктивності, а також щільності портів такі платформи істотно випереджають комутатори на базі процесорів x86. Проте в замовника є вибір типу платформи для комутатора, що є важливу ознаку відкритих мереж.

Наступний ключовий елемент для вибору – мережна ОС. Як уже говорилося, раніше мережні ОС були жорстко прив'язані до «заліза». Тепер, якщо ваш постачальник комутатора прихильний принципам відкритості, у вас є вибір ОС. За останні кілька років з'явилося чимало розроблювачів незалежних мережних ОС: Cumulus Networks, Big Switch, Pica8, IP Infusion, Pluribus Networks і ряд інших компаній. Відповідно, чимало й апаратних платформ, що дозволяють інсталиувати ту мережну ОС, що більше підходить (подобається) конкретному замовникові.

У кожній мережній ОС є свої особливості й кращі області застосування. Наприклад, система Big Switch має свої переваги при створенні моніторингових комутаторів і побудові мережних фабрик у ЦОДах; рішення IP Infusion – при організації територіально розподілених мереж, у тому числі об'єднуючих віддалені ЦОДи; Pluribus Networks – при побудові розподілених фабрик ЦОДів, рішенні завдань аналітики й безпеки. Важливим плюсом системи Cumulus Linux є те, що замовники можуть використовувати уніфіковані засоби для керування мережею й серверами, які базуються на Linux. Комутатори Dell для відкритих систем (у їхній назві присутнє абревіатура ON – від Open Networks) підтримують названі мережні ОС, а також операційну систему самої Dell, що, природно, фахівці компанії найчастіше рекомендують замовникам.

Що необхідно для того, щоб мережна ОС одного постачальника могла працювати на комутаторі іншого? Безумовно, треба гарантувати властиво установку ОС. При цьому бажано уникнути необхідності створення окремого образу під конкретний комутатор і максимально спростити установку. Для цього було розроблене середовище Open Network Installation Environment (ONIE). По суті, підтримка ONIE означає наявність передвстановленого ядра Linux (микролинукс), що при першому завантаженні шукає джерело для установки повноцінної мережній ОС.

Середовище ONIE є одним із проєктів Open Compute Project – співтовариства, заснованого Facebook (а згодом підтриманого такими компаніями, як Microsoft і Intel) з метою розробки оптимальної IT-інфраструктури для ЦОДів, включаючи сервери, системи зберігання, мережа й навіть стійки для розміщення встаткування. На відміну від більшості ініціатив, що стосуються «відкритих мереж», ОСР приділяє основну увагу не софту, а залозу. Одна з головних цілей співтовариства ОСР – просування енергоефективних і заснованих на

типових компонентах технічних рішень, які б дозволили знизити капітальні й операційні витрати власників великих ЦОДів. Однак розробки ОСР, мабуть, можуть виявитися надзвичайно корисними й для інших категорій замовників.

Інша важлива розробка Open Compute Project – інтерфейс Switch Abstraction Interface (SAI), наявність якого дозволить перенести ОС на різні апаратні платформи. По суті SAI специфікує відкритий інтерфейс API для програмування мікросхем ASIC, що забезпечують високошвидкісну комутацію трафіку. Одним з основних ініціаторів розробки SAI була Microsoft, що вже розкрила деталі своєї мережної операційної системи Azure Cloud Switch (ACS). Взагалі, відкриті мережі творять чудеса. Ця ОС від Microsoft реалізована на базі Linux. Ще раз повторюю: Microsoft... на базі Linux!

Слідом за поділом комутаторів на встаткування й ПЗ галузь пішла далі по шляху дезагрегації властиво мережних ОС і самих апаратних платформ. Уже згадана система Azure Cloud Switch по суті є модульною (див. мал. 3). Ще один приклад модульної мережний ОС – новітня система OS10 компанії Dell. Ця ОС включає базовий модуль (на основі немодифікованого дистрибутива Linux з відкритим вихідним кодом) і різні модулі додатків. Це можуть бути додатка самої Dell і сторонніх розроблювачів, а також «рідні» додатки Linux з відкритим вихідним кодом, включаючи програми для організації мережної фабрики, маршрутизації, безпеки, керування й автоматизації. Такі інтернет-гіганти, як Google, Facebook і LinkedIn, розробили власні дезагегровані комутатори й, судячи із вступників від них інформації, цілком ними задоволені. Видимо, побоюючись, що слідом за ними на шлях створення власних комутаторів устануть і менші великі замовники, багато хто з постачальників традиційних мережних рішень також анонсували свої стратегії в області «відкритих мереж» і представили відповідні продукти. Це, зокрема, уже згадані в статті Dell і Mellanox, а також HP Enterprise і Juniper. І схоже, що найближчим часом до них приєднаються й інші гравці мережного ринку.

А що ж багаторічний і безперечний лідер ринку? А він тим часом пішов «проти тренда», запропонувавши нове покоління комутаторів Nexus на основі... власного набору мікросхем. При цьому, як затверджують представники компанії, своя елементна база – важлива конкурентна перевага Cisco, що забезпечує їй комутаторам кращі характеристики. Правда, Cisco розвиває й рішення на базі комерційних чипів, але для флагманських ЦОДівських моделей робить ставку на власні.

Компанія не приєдналася до тяги, що охопила галузь, до дезагрегації комутаторів і підтримки мережних ОС сторонніх розроблювачів. Однак у вересні 2016 року запропонувала набір засобів по розширенню функцій мережний ОС NX-OS для комутаторів сімейств Nexus 3000 і 9000. Він одержав назву Open NX-OS і забезпечує багато чого з того, що активно просувають постачальники дезагеггованих комутаторів. Зокрема, підтримуються добре знайомі багатьом фахівцям по ІТ інструменти Linux (NX-OS заснований на Linux), засобу для керування конфігураціями Puppet, Chef та ін. Більше того, можливо навіть використання засобів маршрутизації сторонніх постачальників, а новий SDK дозволяє розроблювачам створювати свої додатки з можливістю їхнього виконання в захищеному контейнері.

Важливим напрямком розвитку «відкритих мереж» для Cisco залишається SDN, у першу чергу рішення Application Centric Infrastructure (ACI). Відкриті програмні інтерфейси API вхідного в це рішення контролера Application Policy Infrastructure Controller (APIC) відкривають широкі можливості для розробки й інтеграції з ACI сторонніх мережних сервісів. В систему партнерів Cisco по ACI уже входять більше 50 компаній, а найближчим часом список поповниться й українським розроблювачем засобів безпеки.

У роботі запропонований наступний підхід до дезагрегації програмного забезпечення й апаратури комутаторів, який представлений на рис. 1.

При необхідності завжди можна модифікувати або замінити компоненти цього комутатора. Наприклад, замість мікросервера, побудованого на процесорах Intel, установити мікросервер на процесорах ARM. Або, скажемо, розмістити всю електронну начинку в іншому корпусі, якщо існують особливі вимоги до захисту від зовнішніх впливів.

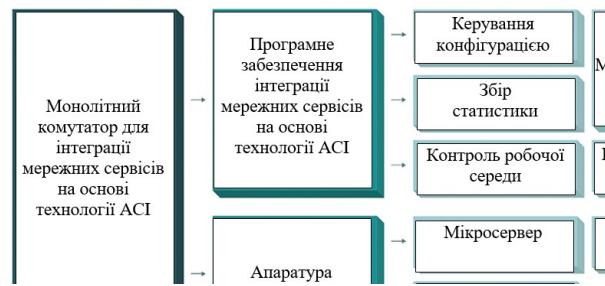


Рисунок 1 – Структурна схема системи

Відкритість інтерфейсів на рівні контролера SDN – річ, можна сказати, природна, споконвічно закладена в ідеологію програмувальних мереж. Забезпечення відкритості на рівні компонентів комутатора – для Cisco питання неоднозначний і куди більше складний. Так що одна з інтриг полягає в тому, чи піде лідер ринку на дезагрегацію комутаторів і підтримку сторонніх мережних ОС.

Висновки. У статті наведені теоретичне узагальнення й рішення наукового завдання дослідження методів інтеграції мережних сервісів на основі технології ACI.

Рішення даного завдання полягало у вирішенні наступних задач:

- Був проведений огляд існуючих систем інтеграції мережних сервісів на основі технології ACI.
- Досліджена система інтеграції мережних сервісів на основі технології ACI.
- На основі отриманих результатів досліджень створена програмна реалізація системи інтеграції мережних сервісів на основі технології ACI.

Розроблені під час виконання випускної кваліфікаційної роботи за другим (магістерським) рівнем вищої освіти алгоритми дозволяють успішно вирішувати завдання інтеграції мережних сервісів на основі технології ACI. 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., Yenchov, 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. 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.
5. 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.
6. Smirnov O., Kuznetsov A., Kiian A., Kuznetsova T. «Non-binary constant weight coding technique». CEUR Workshop Proceedings. Volume 2740, 2020, Pages 102-114.
7. 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.
8. 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.
9. Smirnov O., Kuznetsov A., Pushkar'ov A., Serhienko 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.
10. 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.
 11. 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.
 12. 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.
 13. 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.
 14. 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.
 15. 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.
 16. 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.
 17. 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.
 18. 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.
 19. 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.
 20. 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.
 21. 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.
 22. 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.
 23. Батрак О., Смірнова Т., Гнатюк В., Одарченко Р., Смірнов О. «Дослідження показників ефективності функціонування та перспектив розвитку систем ІР-телефонії». Підводні технології, 2024, № 13, с. 28-35.
 24. 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.
 25. 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.
 26. 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.
 27. 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.