

О. М. Данильчук¹
В. В. Ковтун²
О. Д. Никитенко²
Ю. Ю. Нестюк²
В. В. Присяжнюк²

ДОСЛІДЖЕННЯ БЕЗДРОТОВОГО ЦЕНТРАЛІЗОВАНОГО МЕРЕЖЕВОГО КЛАСТЕРА З РЕАЛІЗАЦІЄЮ СЕАНСІВ ІНФОКОМУНІКАЦІЙНОЇ ВЗАЄМОДІЇ В НЕЗАЛЕЖНИХ ВІРТУАЛЬНИХ СЕГМЕНТАХ

¹ Донецький національний університет імені Василя Стуса;

² Вінницький національний технічний університет

Зростаючий тренд обсягу інформаційного трафіку в системах централізованого бездротового зв'язку очевидно доводять необхідність еволюції поколінь мобільної комунікації, зокрема, перехід від покоління 4G до 5G. Згідно зі специфікацією, в останньому мають бути реалізовані гнучкі сервіси для управління трафіком, підвищення ефективності яких є актуальною задачею. В статті представлена математична модель процесу функціонування бездротового централізованого мережевого кластера, сеанси інфокомунікаційної взаємодії в якому реалізуються в незалежних віртуальних сегментах інформаційного простору базової станції. Досліджуваний процес описується марковською системою масового обслуговування, входи конвеєрів якої узгоджені з незалежними потоками вхідних запитів від кінцевих пристроїв. При цьому враховується, що для обслуговування кожного такого потоку в інформаційному середовищі базової станції зарезервовані відповідний обсяг системних ресурсів — так званий віртуальний сегмент, вага якого залежить від пріоритету відповідного потоку. Розподіл обсягу системних ресурсів базової станції між зваженими віртуальними сегментами здійснюється спеціалізованим управляючим сервісом динамічно. В рамках запропонованого математичного апарату сформульований алгоритм примусової термінації активного сеансу інфокомунікаційної взаємодії в переважаному віртуальному сегменті та сервіс управління розподілом вивільнених системних ресурсів між рештою віртуальних сегментів з урахуванням ступеня їх переваження. Результати імітаційного моделювання показали, що функціональний механізм примусової термінації інфокомунікаційних сеансів та сервіс розподілу системних ресурсів, запропоновані авторами, дозволяють базовій станції 5G продовжувати приймати нові вхідні запити попри переважаність окремих віртуальних мережевих сегментів. Експерименти показали, що запропоновані програмні засоби ефективно адаптуються до наявного загально доступного для розподілу обсягу системних ресурсів та способу виділення в його межах гарантованих обсягів системних ресурсів для окремих віртуальних мережевих сегментів.

Ключові слова: централізований мережевий кластер, сеанс інфокомунікаційної взаємодії, віртуальний сегмент, математична модель доступності, сервіс управління розподілом ресурсів.

Вступ

Впродовж останнього десятиріччя галузь мереж і систем зв'язку відзначилася експоненційним зростанням як кількості абонентських пристроїв, так і загального обсягу трафіку, що передається бездротовими каналами в мережах зв'язку загального призначення. За оцінками різних джерел така тенденція збережеться і в найближчому майбутньому [1]—[3]. Все більшу частку абонентсь-

ких пристроїв складають мобільні пристрої, які вже навіть виділили в специфічну екосистему, відому як Internet of Werable Things (IoWT) [3]. Перелік класів пристроїв IoWT постійно розширюється і зараз включає як вже традиційні смартфони, так і розумні годинник, браслети, окуляри доповненої і віртуальної реальності і т. ін. Саме пристрої IoWT в умовах сучасних мегаполісів генерують левову частку інформації, спричиняючи виключно високе навантаження на абонентський сегмент комунікаційних мереж.

Крім постійного зростання обсягів інформаційної взаємодії, в сучасних умовах на мобільний трафік впливають збурювальні фактори, поява яких лише стохастично локалізується в часі і просторі. Якщо говорити про час, то інтенсивність мобільного трафіку розподіляється впродовж доби суттєво нерівномірно, що спричиняє необхідність активації відповідних сервісів для балансування процесу функціонування мереж зв'язку. Водночас, просторовий фактор проявляє себе в явищах інтерференції або ж блокуванні одних абонентів іншими в умовах складного урбаністичного рельєфу сучасних міст. Компенсування впливу цих факторів стає дедалі складнішою задачею зі зростанням кількості пристроїв IoWT.

Зважаючи на використання міліметрового діапазону частот, в комунікаційних засобах покоління 5G застосовуються антенні решітки, які характеризуються високою спрямованістю. Таке технологічне рішення забезпечує високу пропускну здатність каналів зв'язку та значно зменшує завади, створювані такими системами. Однак, практика експлуатації комунікаційних пристроїв 4G-LTE і 5G виявила низку унікальних негативних явищ. Зокрема, це фізичне блокування сфокусованого комунікаційного каналу, що призводить до частого і тривалого падіння рівня сигналу, яке неможливо компенсувати відпрацьованими на поколіннях 2G, 3G технологіями. Залежно від ступеня та тривалості явища падіння рівня сигналу, його поява може спричинити як понаднормальне зростання обсягів ресурсів, спрямованих базовою станцією для підтримки заданої швидкості інформаційної взаємодії, так і передчасну термінацію процесу інформаційної взаємодії. Таким чином, для підвищення показників якості обслуговування абонентів в мережах покоління 5G необхідно розв'язати низку нових задач, що можна зробити лише створивши методологію математичних моделей для адекватного опису процесів, специфічних для мереж цього покоління.

Отже, *об'єктом дослідження* є процес експлуатації бездротового централізованого мережевого кластера, інформаційне середовище якої підтримує функціонування незалежних віртуальних мережевих сегментів.

Огляд аналогів

Завданням мереж зв'язку покоління 5G є задоволення зростаючих потреб держав, установ, підприємств та окремих громадян в мобільному зв'язку відповідного рівня якості. Передбачається [2], [4]—[6], що саме мережі покоління 5G відіграватимуть ключову роль у перетворенні мегаполісів на «розумні міста», що дозволить громадянам та суспільству в цілому отримати повною мірою ті соціально-економічні вигоди, які дає передова цифрова економіка з інтенсивним цільовим використанням даних.

Концепція побудови мереж зв'язку покоління 5G створювалася на засадах підвищення якості, надійності та продуктивності обслуговування кінцевих абонентів, пропонуючи нові сервіси і додатки з гігабітною швидкістю передавання даних. Зокрема, підвищивши рівень розгорнутих мобільних мереж до покоління 5G, оператори мобільного зв'язку зможуть не тільки надавати послуги та сервіси рівня покоління 3G і 4G, а й розробляти власні рішення і сервіси для споживачів і промисловості, реалізація яких відбуватиметься в незалежних віртуальних мережевих сегментах, створених як на рівні однієї базової станції, так і їх конгломерату [7]—[10].

Хоча стандартизація мереж зв'язку покоління 5G ще триває, починаючи з 2020 року, комерційні мережі 5G вже почали розгортатися. Асоціація GSM прогнозує, що до 2025 року кількість сеансів одноразового підключення до мереж покоління 5G перевищить цифру $1,1 \cdot 10^9$ і складатиме близько 12 % від всієї очікуваної кількості подій цього типу [11]—[13]. Також прогнозується, що до 2025 року загальні прибутки операторів послуг мобільного зв'язку зростуть на величину близько 2,5 % і досягнуть рівня $1,3 \cdot 10^{12}$ [12], [14].

З технічної сторони очікується, що перехід мереж зв'язку до рівня покоління 5G супроводжуватиметься значним зростанням швидкості та зменшення затримок зв'язку. Зокрема, мережі зв'язку покоління 5G мають функціонувати так, щоб затримка зв'язку не перевищувала 1 мс на бездротовому сегменті каналу поширення сигналу, що дозволить реалізацію сервісів критичного

застосування на їх основі [15]—[18]. Також в мережах зв'язку покоління 5G технологічно можливо є пікова швидкість до 10 Gbps для кінцевого абонента, що дозволяє операторам зв'язку надавати широкий спектр високошвидкісних широкосмугових послуг і стати реальною альтернативою супутниковому зв'язку.

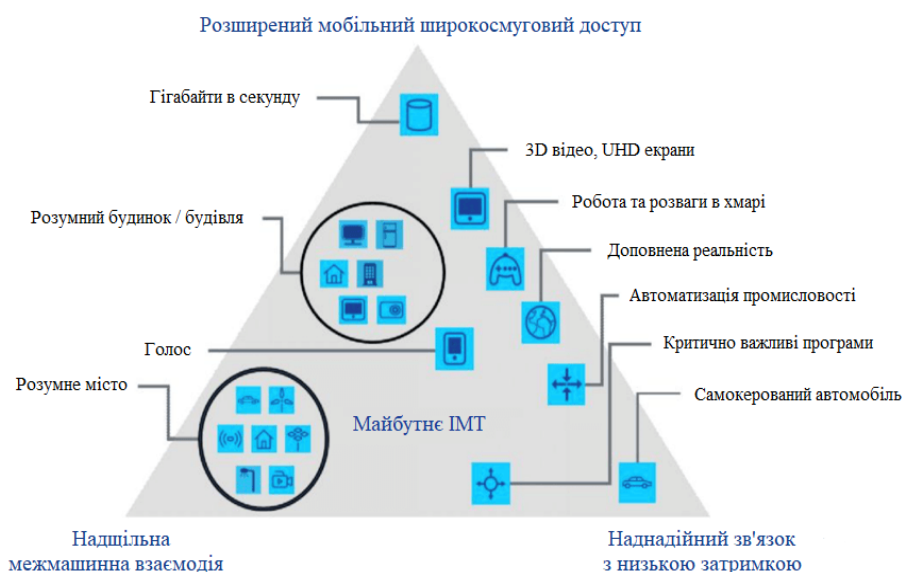
Оператори систем мобільного зв'язку, виробники обладнання та організації зі стандартизації мереж зв'язку визначили три найперспективніших і принципово різних категорії послуг, можливих для впровадження в мережах зв'язку покоління 5G. Це послуга розширеного широкосмугового доступу (Enhanced Mobile Broadband, eMBB) [19]—[21], послуга наднадійного зв'язку з низькими затримками (Ultra-Reliable Low-Latency Communications, URLLC) [22]—[24] і послуга надщільної міжмашинної взаємодії (Massive Machine-Type Communications, mMTC) [25]—[27].

Послуга eMBB спрямована на задоволення потреб у надвисокій швидкості в абонентському сегменті [26]—[29]. Потреба в такій швидкості виникає у користувачів додатків для: перегляду відео високої роздільної здатності; використання окулярів і шоломів доповненої і віртуальної реальності; передачі та оперування «Великими даними». Очікується, що eMBB буде основним варіантом застосування 5G на ранньому етапі його розгортання. Деякі оператори мобільного зв'язку розглядають eMBB як перспективне рішення проблеми «останньої милі» для місцевості з відсутньою кабельною мережевою інфраструктурою сучасного рівня [28].

Властивий реалізований на платформі 5G послугі URLLC високий якісний рівень показників затримки і кібербезпеки відіграватиме важливу роль в розвитку інтелектуальних транспортних систем майбутнього, дозволяючи транспортним засобам комутувати між собою, і створювати нові сервіси для самокерованих легкових і вантажних автомобілів [29], [30]. Потреба в послугі URLLC стає очевидною, якщо вдатися до такого прикладу: керований через хмарний сервіс водіння автономний транспортний засіб має за командами, що передаються в реальному часі, негайно зупинитися, прискорюватися або повертати. Будь-яка затримка чи втрата з'єднання у інформаційній взаємодії такого автономного авто з базовою станцією може призвести до катастрофічних наслідків. Властива послугі URLLC низька затримка також дозволяє розглядати мережі покоління 5G як базис для реалізації сервісів для віддаленої хірургії, автоматизації виробництва і управління процесами в реальному часі [31], [32].

Очікується, що завдяки послугі mMTC мережі зв'язку покоління 5G також сприятимуть розвитку розумних міст і «Інтернету речей» шляхом розгортання сенсорних мереж в містах і сільській місцевості. Закладені в основу платформи 5G орієнтири на безпеку і надійність інформаційної взаємодії зроблять такі мережі придатними для застосування в критично важливих службах [33]—[38], таких, до прикладу, як поліція, служби безпеки, енергетика, водопостачання та охорону здоров'я.

Спектр потенційно перспективних послуг, які можна реалізувати саме завдяки можливостям мереж зв'язку покоління 5G, не обмежується згаданими eMBB, URLLC і mMTC. Ці послуги представляють лише найтипівіші реальні сценарії з полярними вимогами до якісних характеристик



комунікаційних послуг. Ці очевидно перспективні послуги формують базис, який на рис. 1 показаний у вигляді трикутника [1]. Сторони трикутника символізують фіксовані якісні вимоги щодо швидкості доступу, надійності передавання і часу затримки. Як всередині трикутника, так і на його гранях розташовані додатки, які можна реалізувати, об'єднавши відповідний набір цих якісних характеристик.

Як вже згадувалося, в Рис. 1. Послуги, які можна реалізувати в технологічному базисі мереж зв'язку покоління 5G частині 1, в платформі 5Ge реалізована технологія формування в інформаційному середовищі базової станції незалежних

віртуальних мережевих сегментів [7]—[10]. Для підтримки кожного такого сегмента виділяються системні ресурси і помилки або несправності, що виникають в одному сегменті, не впливають на значення показників якості обслуговування (Quality of Service, QoS) для решти сегментів. Іншими словами, ізоляція віртуального мережевого сегмента для забезпечення відповідної номенклатури сервісів належної якості гарантується. Водночас, алгоритм розподілу радіоресурсів повинен забезпечувати ефективне цільове використання системних ресурсів базової станції з урахуванням того, що для кожного активного віртуального мережевого сегмента виділяється відповідний гарантований обсяг цих ресурсів [8], [10].

Ця тематика останнім часом привертає підвищену увагу дослідників. В роботах [7]—[9] представлена гнучка модель структурування мережі радіодоступу (Radio Access Network, RAN). Модель сконцентрована на забезпеченні належного рівня ізоляції ресурсів операторів віртуальних мереж (Virtual Network Operator, VNO), які є орендарями мережевого трафіку. Рівень ізоляції визначається так, щоб гарантувати, що укладена між VNO угода про рівень обслуговування (Service Level Agreement, SLA) не порушуватиметься навіть за зміни різних мережевих параметрів. Шуканий рівень ізоляції визначається в результаті оптимізації використовуваної інфраструктури RAN шляхом динамічного розподілу радіоресурсів між різними сегментами справедливим чином.

В роботах [10], [39] також розглядається система управління віртуальними радіоресурсами (Virtual Radio Resource Management, VRRM), яка забезпечує оптимальне використання віртуалізованих ресурсів постачальника інфраструктури між декількома операторами віртуальної мережі. У статтях представлена архітектура інструмента моделювання VRRM в термінах систем масового обслуговування [39]. За допомогою розробленого інструмента проводиться аналіз практичного сценарію з трьома постачальниками і різними типами SLA і досліджуються показники продуктивності у разі зміни навантаження на трафік і SLA.

У роботах [11], [15], [40] розглядається теоретична основа для мультиоператорного планування (Multi-Operator Scheduling, MOS) розподілу радіоресурсів. Завдяки динамічній адаптації до навантаження комунікаційного каналу централізований підхід максимізує спектральну ефективність для декількох операторів з повним контролем над гарантіями спільного використання.

Втім, спільним для всіх загаданих робіт є ігнорування реального сценарію перевантаження окремих віртуальних мережевих сегментів в процесі експлуатації базової станції. В згаданих моделях у випадку, якщо вхідний запит спрямовується до віртуального мережевого сегмента, а гарантований обсяг виділених базовою станцією ресурсів вичерпано, то такий вхідний запит втрачається, навіть якщо в інформаційному середовищі базової станції були в наявності придатні до розподілу системні ресурси. Для моделювання цього аспекту процесу експлуатації базової станції 5G в статті вибрано *предметом дослідження* математичний апарат систем масового обслуговування, математичного та імітаційного моделювання і теорії планування експерименту.

Моделі і методи

Постановка задачі дослідження

Наведена у вступі інформація підтверджує актуальність питання розподілу комунікаційного ресурсу базової станції стільникового зв'язку між елементами множини виділених логічних віртуальних мережевих сегментів. Характерною особливістю такої технології розподілу радіоресурсу є незалежність віртуальних мережевих сегментів як на рівні частотно-обчислювальних ресурсів, так і на рівні активних сервісів. Під незалежністю вважається, що для певної базової станції на значення показників якості обслуговування в конкретному віртуальному мережевому сегменті функціонування решти віртуальних мережевих сегментів не впливає. Якість реалізації такої технології мережевої віртуалізації цілком визначається ефективністю цільового управляючого програмного сервісу, який функціонує на рівні інформаційного середовища базової станції. Створення такого сервісу можливе лише за умови наявності адекватної профільної математичної моделі.

Отже, *метою дослідження* є створення сервісу управління процесом експлуатації бездротового централізованого мережевого кластера, інформаційне середовище якого підтримує функціонування незалежних віртуальних мережевих сегментів

Дослідимо процес експлуатації локалізованого бездротового централізованого мережевого кластера, інформаційне середовище якого підтримує функціонування S віртуальних мережевих сегментів за умови, що управляючий сервіс розподіляє між ними C у. о. системних перств. Згідно з прийнятою QoS політикою, кожний s -й, $s \in S$, віртуальний мережевий сегмент має забезпечувати

підтримку інформаційної інфокомунікаційної взаємодії зі швидкістю, значення якої знаходиться в діапазоні $[a_s, b_s]$, $a_s, b_s \geq 0$, $a_s \leq b_s$. При цьому фактичне значення швидкості є функцією від часу і кількості активних сеансів інфокомунікаційної взаємодії в масштабі всього інформаційного середовища базової станції. В масштабі окремого віртуального мережевого сегмента наявні системні ресурси розподіляються між активними сеансами інфокомунікаційної взаємодії рівномірно.

Представимо щойно описану концепцію як мультиконвеєрну систему масового обслуговування, входи якої узгоджені з S потоками запитів на встановлення інфокомунікаційної взаємодії з S віртуальними мережевими сегментами, відповідно. Всі ці потоки є пуасонівськими, з інтенсивностями λ_s , $s \in S$, відповідно. Всі запити включають сервісну інформацію щодо бажаних обсягів системних ресурсів. Значення цих стохастичних величин розподілені за експоненціальним законом з параметром $1/\mu_s$, $s \in S$. Для підтримки прийнятого s -м віртуальним мережовим сегментом вхідного запиту управляючий сервіс розподіляє скінченний обсяг системних ресурсів $r_s \in [a_s, b_s]$, який і визначає фактичну швидкість адресної клієнт-сегментної інформаційної взаємодії. При цьому весь наявний обсяг системних ресурсів становить C у.о. В кожній ініціації або термінації сеансу клієнт-сегментної інформаційної взаємодії управляючий сервіс здійснює перерозподіл системних ресурсів між віртуальними мережевими сегментами.

Таким чином, *задачами дослідження є:*

1. Формалізувати в парадигмі теорії систем масового обслуговування математичної моделі процесу експлуатації бездротового централізованого мережевого кластера, інформаційне середовище якої підтримує функціонування незалежних віртуальних мережових сегментів;
2. Сформулювати на основі створеної математичної моделі функціональний алгоритм примусової термінації активного сеансу клієнт-сегментної інформаційної взаємодії в перевантаженому віртуальному мережевому сегменті та сервіс управління розподілом вивільнених системних ресурсів між рештою віртуальних мережових сегментів з врахуванням ступеня їх перевантаженості;
3. Провести імітаційне моделювання та обчислювальний експеримент для доведення адекватності створеної математичної моделі та ефективності створених на її основі функціональних сервісів.

Математична модель процесу експлуатації бездротового централізованого мережевого кластера, інформаційне середовище якого підтримує функціонування віртуальних мережових сегментів

Ідентифікуємо процес експлуатації локалізованого бездротового централізованого мережевого кластера, інформаційне середовище якого підтримує функціонування S віртуальних мережових сегментів, як стохастичну функцію $X(t) = \{m_s(t)\}$, $s = \overline{1, S}$, де m_s — кількість активних сеансів клієнт-сегментної інформаційної взаємодії для s -го віртуального мережевого сегмента в момент часу t : $m_s \in \left\{0, 1, \dots, \left\lfloor \frac{C}{a_s} \right\rfloor\right\} \forall s \in S$. Визначимо простір станів стохастичного процесу $X(t)$:

$$X = \left\{ (m_1, m_2, \dots, m_s), \sum_{s=1}^S m_s a_s \leq C \right\}$$
. Якщо обсяг системних ресурсів, розподілених управляючим сервісом для підтримки одного активного сеансу клієнт-сегментної інформаційної взаємодії для s -го віртуального мережевого сегмента становить r_s у. о., то інтенсивність обслуговування запитів дорівнює $r_s \mu_s \forall s \in S$.

Для локалізації s -го віртуального мережевого сегмента в інформаційному просторі бездротового централізованого мережевого кластера передбачимо, що управляючий сервіс гарантовано виділяє на його підтримку \bar{R}_s у. о. системних ресурсів, що, відповідно, гарантує підтримку $\bar{M}_s = \lfloor \bar{R}_s / a_s \rfloor$ активних сеансів клієнт-сегментної інформаційної взаємодії. Віртуальний мережовий сегмент, в інформаційному просторі якого підтримується більше активних сеансів клієнт-сегментної інформаційної взаємодії ніж гарантована підтримувана їх кількість \bar{M}_s , називатимемо перевантаженим. В умовах дефіциту вільних системних ресурсів, підтримка гарантованих сеансів клієнт-сегментної інформаційної взаємодії в будь-якому віртуальному мережевому сегменті здійснюється за рахунок передчасної термінації необхідної кількості активних сеансів клієнт-сег-

ментної інформаційної взаємодії в перевантажених віртуальних мережевих сегментах. Якщо дефіцит вільних системних ресурсів спостерігається за умови відсутності перевантажених віртуальних мережевих сегментів, то вхідний запит втрачається.

Дослідимо динаміку стохастичного процесу X у часі: $X(t)$. Нехай екосистема базової станції 5G знаходиться в стані $(m_1, m_2, \dots, m_s) \in X$. Тоді при надходженні до s -го віртуального мережевого сегмента вхідного запиту реалізується один з таких сценаріїв:

1: $(m_1, m_2, \dots, m_s + 1, \dots, m_s) \in X$ — в бездротовому централізованому мережевому кластері достатньо вільних системних ресурсів, отже, вхідний запит приймається і стохастичний процес $X(t)$ переходить в стан $(m_1, m_2, \dots, m_s + 1, \dots, m_s)$;

2: $(m_1, m_2, \dots, m_s + 1, \dots, m_s) \notin X$ — в бездротовому централізованому мережевому кластері не достатньо вільних системних ресурсів, отже:

2.1: якщо $m_s < \bar{M}_s$ та $m_k > \bar{M}_k$, $s, k \in S$, $s \neq k$, то здійснюється вивільнення системних ресурсів шляхом примусової термінації активного сеансу клієнт-сегментної інформаційної взаємодії в k -му перевантаженому віртуальному мережевому сегменті:

$$B_s = \{(m_1, m_2, \dots, m_s)\} : [(m_1, m_2, \dots, m_s + 1, \dots, m_s) \notin X] \cap [(m_s < \bar{M}_s) \cup (m_k > \bar{M}_k \forall s, k \in S, s \neq k)],$$

де B_s — простір станів з примусовою термінацією активного сеансу клієнт-сегментної інформаційної взаємодії. Функціональний алгоритм реалізації п. 2.1 буде сформульовано далі у частині 3;

2.2: вхідний запит втрачається:

$$D_s = \{(m_1, m_2, \dots, m_s + 1, \dots, m_s)\} : [(m_1, m_2, \dots, m_s + 1, \dots, m_s) \notin X] \cap [(m_s \geq \bar{M}_s) \cup (m_k \leq \bar{M}_k \forall s, k \in S, s \neq k)],$$

де D_s — простір станів втрати вхідного запиту.

Функціональний алгоритм примусової термінації активного сеансу клієнт-сегментної інформаційної взаємодії

Враховуючи високу імовірність ситуації, коли в бездротовому централізованому мережевому кластері виявиться більше одного перевантаженого віртуального мережевого сегмента, доцільно ввести параметр, який дозволить кількісно охарактеризувати ступінь їх відносної перевантаженості. Формалізуємо варіанти визначення цього характеристичного параметра

$$w_s^{(1)} = \begin{cases} 1 \forall m_s \leq \bar{M}_s, \\ \frac{1}{m_s - \bar{M}_s + 1} \forall m_s > \bar{M}_s; \end{cases} \quad (1)$$

$$w_s^{(2)} = \begin{cases} 1 \forall m_s \leq \bar{M}_s, \\ \frac{\bar{M}_s}{m_s} \forall m_s > \bar{M}_s; \end{cases} \quad (2)$$

$$w_s^{(3)} = \begin{cases} 1 \forall m_s \leq \bar{M}_s, \\ w = \text{const} \forall m_s > \bar{M}_s. \end{cases} \quad (3)$$

Потреба у примусовій термінації активного сеансу клієнт-сегментної інформаційної взаємодії виникає тоді, коли вхідний запит надходить до не перевантаженого віртуального мережевого сегмента s і при цьому в бездротовому централізованому мережевому кластері бракує необхідного обсягу вільних системних ресурсів: $\{[(m_1, m_2, \dots, m_s + 1, \dots, m_s) \notin X] : (m_s + 1)a_s \leq R_s\}$. Отже, якщо щойно описана ситуація реалізувалася, то:

1. Шукаємо віртуальний мережевий сегмент з найменшим значенням ступеня перевантаженості: $s^* \in S : w_{s^*} = \min \{w_r, r \in S\}$;

2. В s^* -му віртуальному мережевому сегменті примусово термінуємо довільний активний сеанс

клієнт-сегментної інформаційної взаємодії: $(m_1, m_2, \dots, m_{s^*} - 1, \dots, m_S)$;

3. Повторюємо п.п. 1, 2 доти, поки умова $C - \sum_{i=1}^S m_i a_i \geq a_s$ не виконається.

Зазначимо, якщо в результаті виконання п. 1 функціонального алгоритму знайдено не один віртуальний мережевий сегмент з найменшим значенням ступеня перевантаженості, а декілька, то вибір з-поміж них робочого для подальшої реалізації функціонального алгоритму здійснюється випадковим чином.

Математичне моделювання сервісу управління розподілом системних ресурсів в бездротовому централізованому мережевому кластері

Якщо в бездротовому централізованому мережевому кластері достатньо вільних системних ресурсів, то доцільно забезпечити потреби віртуальних мережевих сегментів за максимальними граничними лімітами b_s : $X_0 = \left[(m_1, m_2, \dots, m_S) : \sum_{s=1}^S m_s b_s \leq C \right]$.

Якщо обсяг вільних системних ресурсів обмежений — $X_1 = X/X_0$, то для ефективного їх розподілу між віртуальними мережевими сегментами необхідно розв'язати задачу оптимізації

$$\sum_{s \in S} w_s(m_s) m_s U_s(r_s) \rightarrow \max; \quad (4)$$

$$\sum_{s \in S} m_s r_s = C, \quad (5)$$

де $U_s(r_s) = \ln(r_s)$ — функція корисності параметра швидкості інформаційної взаємодії для s -го віртуального мережевого сегмента, $s \in S$, $r = (r_1, r_2, \dots, r_S)$. Для розв'язку такої нелінійної задачі оптимізації застосуємо наближений метод проєкції градієнта [41], в якому матрицю проєціювання на гіперплощину (5) в загальному вигляді визначимо як

$$P = \{r \in \mathbb{R}^S : a_s \leq b_s, s \in S\}. \quad (6)$$

У вибраному для розв'язку методі ітеративна процедура пошуку екстремуму визначається за такими виразами:

$$d_k = P \nabla f(x_k); \quad (7)$$

$$x_{k+1} = x_k + \tau_k d_k; \quad (8)$$

$$\tau_k > 0 : x_{k+1} \in P. \quad (9)$$

де x — вектор керованих змінних, а матриця проєціювання P визначається як

$$P = I - m \left(m m^T \right)^{-1} m = I - \frac{1}{\sum_{s \in S} m_s^2} m^T m,$$

де $m = (m_1, m_2, \dots, m_S)$ — характеристичний вектор поточного стану досліджуваної екосистеми. Градієнт функції корисності $\nabla f(x_k)$ у виразі (7) є вектор-стовпцем вигляду

$$\nabla f(x_k) = \left(\frac{w_s m_s}{r_s} \right), s \in S. \quad (10)$$

Значення кроку τ_k вибираємо так, щоб не вийти за межі області допустимих розв'язків P , яка визначається безпосередніми обмеженнями (5), (6) задачі оптимізації (4). Як ініціювальні значення елементів вектора x_0 візьмемо координати точки перетину гіперплощини (5) з діагоналлю, яка з'єднує вершини (a_1, a_2, \dots, a_S) і (b_1, b_2, \dots, b_S) паралелограма P . Шукані координати знайдемо в результаті розв'язку системи лінійних рівнянь

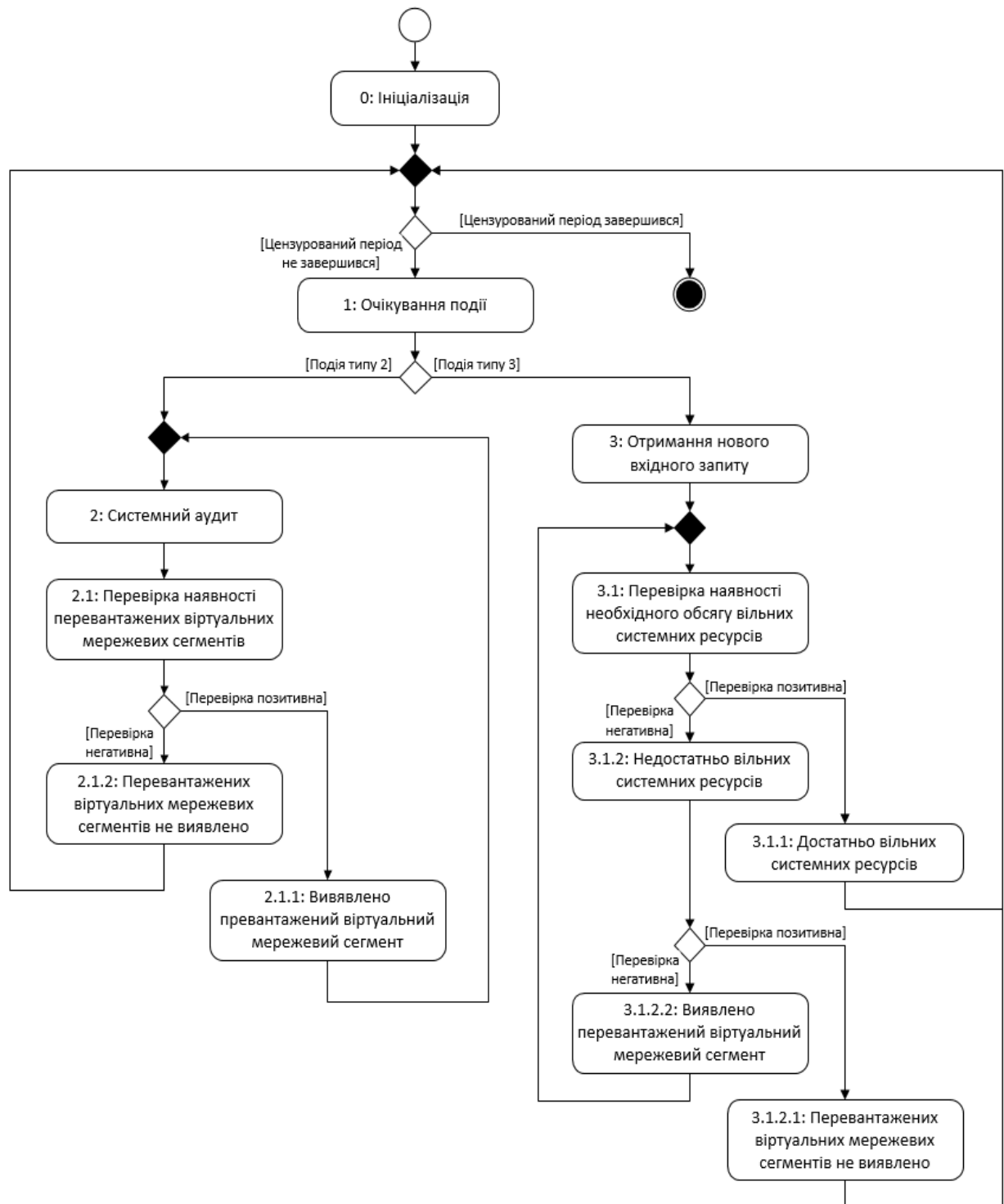


Рис. 2. UML-діаграма активності експерименту з імітаційного моделювання процесу експлуатації базової станції 5G, інформаційне середовище якої підтримує функціонування віртуальних мережевих сегментів

В результаті проведених експериментів отримані функціональні залежності $D_s = f(C)$, $\bar{R}_s = f(C)$, $\Delta T_s = f(C)$, $s = \{1, 2, 3\}$, де D_s — імовірність втрати вхідного запиту, адресованого до s -го віртуального мережевого сегмента, %; \bar{R}_s — середній фактичний обсяг s -го віртуального мережевого сегмента, у.о.; ΔT_s — відносна (до всього цензурованого періоду експлуатації досліджуваної системи) тривалість перебування s -го віртуального мережевого сегмента в стані перевантаження, %. Емпірично отримані графіки функцій $D_s = f(C)$, $\bar{R}_s = f(C)$, $\Delta T_s = f(C)$, $s = \overline{1, 3}$, показані на рис. 3—5, відповідно.

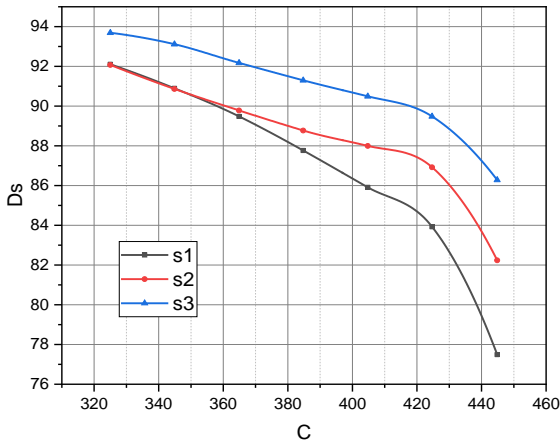


Рис. 3. Функціональна залежність $D_s = f(C)$ для дослідженої бездротового централізованого мережевого кластера

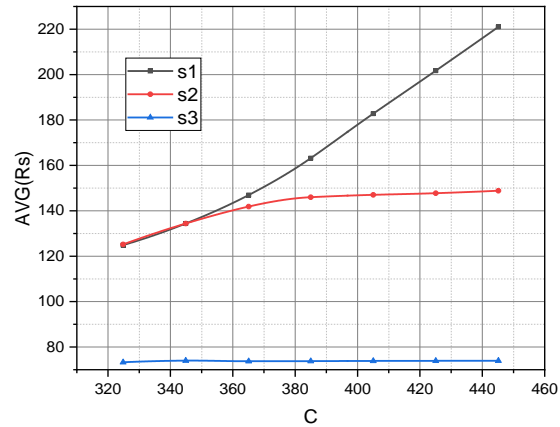


Рис. 4. Функціональна залежність $\bar{R}_s = f(C)$ для дослідженої бездротового централізованого мережевого кластера

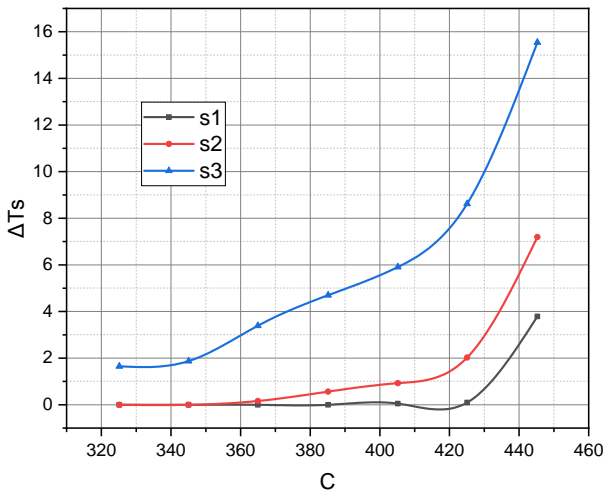


Рис. 5. Функціональна залежність $\Delta T_s = f(C)$ для дослідженої бездротового централізованого мережевого кластера

Обговорення

Аналізуючи у першому наближенні наведені на рис. 3 графіки функцій $D_s = f(C)$ для трьох віртуальних мережевих сегментів (s_1, s_2, s_3), які функціонували протягом цензурованого часу в інформаційному середовищі досліджуваного бездротового централізованого мережевого кластера, можна констатувати, що імовірність втрати вхідного запиту нелінійно спадає зі зростанням максимального обсягу доступних для використання системних ресурсів. Але, зважаючи, що ступінь завантаженості всіх віртуальних мережевих сегментів однакова (інтенсивності надходження і обслуговування вхідних запитів дорівнювали: $\lambda = \{30, 30, 30\}$, $\mu = \{30, 30, 30\}$), а розподіл гарантованих обсягів доступних системних ресурсів між сегментами нерівномірний

($\bar{R} = \{225, 150, 75\}$ Mbps), то початкове значення і швидкість спадання графіків функцій $D_s = f(C)$ зі зростанням значення аргументу виявилися неоднаковими. Очевидним є зв'язок — чим більшим є гарантований обсяг доступних системних ресурсів для певного віртуального мережевого сегмента, тим меншим є притаманна йому імовірність втрати вхідного запиту. Нелінійний характер наведених на рис. 3 графіків функцій корелює з аналітичним представленням сервісу управління розподілом системних ресурсів в бездротовому централізованому мережевому кластері (див. частину 3.4). Взята в основі цього сервісу задача оптимізації із цільовою функцією (4) і обмеженнями (5), (6) класифікована як нелінійна. Водночас, спадний характер графіків функцій $D_s = f(C)$, $s = 1, 3$, однозначно підтверджує ефективність функціонування щойно згаданого сервісу управління.

Показані на рис. 4 графіки функцій $\bar{R}_s = f(C)$, $s = 1, 3$, за порядком динаміки зростання їхніх значень зі зростанням значення аргументу можна розташувати так: $\bar{R}_3 = f(C)$, $\bar{R}_2 = f(C)$, $\bar{R}_1 = f(C)$. Цей порядок знову корелює з первинним розподілом гарантованих обсягів доступних системних ресурсів між віртуальними мережевими сегментами ($\bar{R} = \{225, 150, 75\}$ Mbps). На прикладі графіків функцій $\bar{R}_3 = f(C)$, $\bar{R}_2 = f(C)$ чітко видно роботу сервісу управління розподілом

системних ресурсів. Він не дозволяє перевантажувати віртуальні мережеві сегменти навіть в умовах стабільного потоку надходження нових вхідних запитів. За це відповідає сервіс системного аудиту, заснований на функціональному алгоритмі примусової термінації активного сеансу клієнт-сегментної інформаційної взаємодії для перевантаженого віртуального мережевого сегмента (див. частину 3.3).

Висновки

В статті вперше запропонована математична модель процесу експлуатації бездротового централізованого мережевого кластера, інформаційне середовище якої підтримує функціонування незалежних віртуальних мережевих сегментів, що надають сервіси клієнт-сегментної інформаційної взаємодії. На відміну від наявних, представлена модель описує досліджуваний процес як мультиконверну систему масового обслуговування, входи якої узгоджені з потоками запитів на встановлення зв'язку з відповідними віртуальними мережевими сегментами. Розподіл спільного обсягу ресурсів між зваженими віртуальними мережевими сегментами в модельованій системі здійснюється динамічно, відповідним програмним управляючим сервісом, з урахуванням адресних інтенсивностей надходження нових вхідних запитів та обслуговування прийнятих вхідних запитів, але у масштабі всього інформаційного середовища бездротового централізованого мережевого кластера. На основі створеної математичної моделі сформульовано функціональний алгоритм примусової термінації активного сеансу клієнт-сегментної інформаційної взаємодії в перевантаженому віртуальному мережевому сегменті та сервіс управління розподілом вивільнених системних ресурсів між рештою віртуальних мережевих сегментів з урахуванням ступеня їх перевантаженості.

Подальші дослідження будуть спрямовані на формалізацію якісної метрики, з урахуванням значень параметрів, з якої можна буде впорядкувати активацію процесу системного аудиту.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] H. Fourati, R. Maaloul, and L. Chaari, "A survey of 5G network systems: challenges and machine learning approaches," *Int. J. Mach. Learn. & Cyber.*, vol. 12, pp. 385-431, 2021. <https://doi.org/10.1007/s13042-020-01178-4>.
- [2] A. Rejeb, and J. G. Keogh, "5G Networks in the Value Chain," *Wireless Pers Commun.*, vol. 117, pp. 1577-1599, 2021. <https://doi.org/10.1007/s11277-020-07936-5>.
- [3] S. K. Rao, and R. Prasad, "Impact of 5G Technologies on Industry 4.0," *Wireless Pers Commun.*, vol. 100; pp. 145-159, 2018. <https://doi.org/10.1007/s11277-018-5615-7>.
- [4] S. K. Goudos, et al. "A Survey of IoT Key Enabling and Future Technologies: 5G, Mobile IoT, Sematic Web and Applications," *Wireless Pers Commun.*, vol. 97, pp. 1645-1675, 2017. <https://doi.org/10.1007/s11277-017-4647-8>.
- [5] Q. Liu, et al. "Ambient backscatter communication-based smart 5G IoT network," *Wireless Com Network*; 34, 2021. <https://doi.org/10.1186/s13638-021-01917-3>.
- [6] J. Parikh, and A. Basu "Technologies Assisting the Paradigm Shift from 5G to 5G," *Wireless Pers Commun.*, vol. 112, pp. 481-502, 2020. <https://doi.org/10.1007/s11277-020-07053-3>.
- [7] Kotulski Z., et al. "Towards constructive approach to end-to-end slice isolation in 5G networks," *EURASIP J. on Info. Security*, 2, 2018. <https://doi.org/10.1186/s13635-018-0072-0>.
- [8] P. Subedi, et al. "Network slicing: a next generation 5G perspective," *Wireless Com Network*, 2021, 102. <https://doi.org/10.1186/s13638-021-01983-7>.
- [9] S. A. AlQahtani, and A. S. Altamrah, "Supporting QoS requirements provisions on 5G network slices using an efficient priority-based polling technique," *Wireless Netw.*, vol. 25, pp. 3825-3838, 2019. <https://doi.org/10.1007/s11276-018-01917-0>.
- [10] Akhtar T., Tselios C., and Politis I. "Radio resource management: approaches and implementations from 5G to 5G and beyond," *Wireless Netw.*, vol. 27, pp. 693-734, 2021. <https://doi.org/10.1007/s11276-020-02479-w>.
- [11] Zhang H., et al. "Editorial: 5G Technologies for Future Wireless Networks," *Mobile Netw Appl.*, vol. 23, 2018, pp. 1459-1461. <https://doi.org/10.1007/s11036-018-1094-z>.
- [12] P. Lindgren, "Multi Business Model Innovation in a World of 5G: What Will Persuasive Business Models Look Like in a World of 5G?" *Wireless Pers Commun.*, vol. 88, pp. 79-84, 2016. <https://doi.org/10.1007/s11277-016-3243-7>.
- [13] I. Aldmour, "Wireless Broadband Tools and Their Evolution Towards 5G Networks," *Wireless Pers Commun.*, vol. 95, pp. 4185-4210, 2017. <https://doi.org/10.1007/s11277-017-4058-x>.
- [14] S. K. Rao, and R. Prasad, "Impact of 5G Technologies on Smart City Implementation," *Wireless Pers Commun.*, vol. 100, pp. 161-176, 2018. <https://doi.org/10.1007/s11277-018-5618-4>.
- [15] G. M. Køien, "On Threats to the 5G Service Based Architecture," *Wireless Pers Commun.*, vol. 119, pp. 97-116, 2021. <https://doi.org/10.1007/s11277-021-08200-0>.
- [16] S. Pratschner, et al. "Versatile mobile communications simulation: the Vienna 5G Link Level Simulator," *Wireless Com Network*, 226, 2018. <https://doi.org/10.1186/s13638-018-1239-6>.
- [17] R. Chávez-Santiago, et al. "5G: The Convergence of Wireless Communications," *Wireless Pers Commun.*, vol. 83, pp. 1617-1642, 2015. <https://doi.org/10.1007/s11277-015-2467-2>.
- [18] L. Ciavaglia, P. Chemouil, and B. Maggs, "Techniques for smart and secure 5G softwarized networks," *Ann. Telecommun.*, vol. 74, pp. 543-544, 2019. <https://doi.org/10.1007/s12243-019-00732-8>.

- [19] Z. R. M. Hajiyat, et al., “Channel Coding Scheme for 5G Mobile Communication System for Short Length Message Transmission,” *Wireless Pers Commun*, vol. 106, pp. 377-400, 2019. <https://doi.org/10.1007/s11277-019-06167-7>.
- [20] SY. Lien, et al. “Optimum Ultra-Reliable and Low Latency Communications in 5G New Radio,” *Mobile Netw*, pp. 1020-1027, 2018. <https://doi.org/10.1007/s11036-017-0967-x>.
- [21] J. F. Monserrat, et al. “METIS research advances towards the 5G mobile and wireless system definition,” *Wireless Com Network*, no. 53, 2015. <https://doi.org/10.1186/s13638-015-0302-9>.
- [22] A. N. Krasilov, E. M. Khorov, and M. V. Tsaritsyn, “On the Capacity of a 5G Network for URLLC,” *J. Commun. Technol. Electron*, vol. 64, pp. 1513-1516, 2019. <https://doi.org/10.1134/S1064226919120088>.
- [23] S. Ma, et al. “Performance Evaluation of URLLC in 5G Based on Stochastic Network Calculus,” *Mobile Netw Appl*, vol. 26, pp. 1182-1194, 2021. <https://doi.org/10.1007/s11036-019-01344-1>.
- [24] R. K. Nandan, and N. B. Adhikari, “A Multi-connectivity Framework and Simulation Analysis of Ultra-Reliable Low Latency Communication (URLLC) in 5G Network,” *J. Inst. Eng. India, Ser. B*, 2021. <https://doi.org/10.1007/s40031-021-00600-x>.
- [25] P. S. M. Tripathi, and R. Prasad, “Spectrum for 5G Services,” *Wireless Pers Commun*, vol. 100, pp. 539-555, 2018. <https://doi.org/10.1007/s11277-017-5217-9>.
- [26] N. H. Mahmood, et al., “Machine type communications: key drivers and enablers towards the 6G era,” *J. Wireless Com Network*, 134, 2021. <https://doi.org/10.1186/s13638-021-02010-5>.
- [27] K. He, Y. Li, et al., “A novel compressed sensing-based non-orthogonal multiple access scheme for massive MTC in 5G systems,” *Wireless Com Network*, no. 81, 2018. <https://doi.org/10.1186/s13638-018-1079-4>.
- [28] M. U. Farooq, et al., “Understanding 5G Wireless Cellular Network: Challenges, Emerging Research Directions and Enabling Technologies,” *Wireless Pers Commun*, vol. 95, pp. 261-285, 2017. <https://doi.org/10.1007/s11277-016-3891-7>.
- [29] U. Maan, and Y. Chaba, “Accurate Cluster Head Selection Technique for Software Defined Network in 5G VANET,” *Wireless Pers Commun*, vol. 118, pp. 1271-1293, 2021. <https://doi.org/10.1007/s11277-021-08072-4>.
- [30] P. Dharanyadevi, and K. Venkatalakshmi, “Proficient routing by adroit algorithm in 5G-Cloud-VMesh network,” *Wireless Com Network*, 89, 2016. <https://doi.org/10.1186/s13638-016-0585-5>.
- [31] MP. Bui, et al., “Social-Aware Caching and Resource Sharing Maximized Video Delivery Capacity in 5G Ultra-Dense Networks,” in *Mobile Netw Appl*, vol. 25, pp. 2037-2049, 2020. <https://doi.org/10.1007/s11036-019-01316-5>.
- [32] Y. Yang, et al., “Resource allocation for virtual reality content sharing based on 5G D2D multicast communication,” *Wireless Com Network*, 112, 2020. <https://doi.org/10.1186/s13638-020-01690-9>.
- [33] O. V. Bisikalo, V. V. Kovtun, and V. V. Sholota, “The information system for Critical Use Access Process Dependability Modeling,” in *9th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT)*, Ceske Budejovice, Czech Republic, 2019, pp. 5-8. <https://doi.org/10.1109/ACITT.2019.8780013>.
- [34] O. V. Bisikalo, V. V. Kovtun, O. V. Kovtun, and O. M. Danylchuk, “Mathematical modeling of the availability of the information system for critical use to optimize control of its communication capabilities,” *International Journal of Sensors, Wireless Communications and Control*, vol. 10 (5), pp. 505-517, 2021. <https://doi.org/10.2174/2210327910999201009163958>.
- [35] O. V. Bisikalo, V. V. Kovtun, and O. V. Kovtun, “Modeling of the Estimation of the Time to Failure of the information system for Critical Use,” in *10th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT)*, Degendorf, Germany, 2020, pp. 140-143. <https://doi.org/10.1109/ACIT49673.2020.9208883>.
- [36] O. V. Bisikalo, D. S. Chernenko, O. M. Danylchuk, V. V. Kovtun, and V. B. Romanenko, “Information technology for TTF optimization of an information system for critical use that operates in aggressive cyber-physical space,” in *International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications, Science and Technology (PIC S&T)*, Kharkiv, Ukraine, 2020, pp. 323-329. <https://doi.org/10.1109/PICST51311.2020.9467997>.
- [37] O. V. Bisikalo, V. V. Kovtun, O. V. Kovtun, and V. B. Romanenko, “Research of safety and survivability models of the information system for critical use,” in *11th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies (DESSERT)*, Kyiv, Ukraine, 2020, pp. 7-12. <https://doi.org/10.1109/DESSERT50317.2020.9125061>.
- [38] O. Bisikalo, O. Kovtun, V. Kovtun, and V. Vysotska, “Research of pareto-optimal schemes of control of availability of the information system for critical use,” *CEUR Workshop Proceedings, CEUR-WS*, vol. 2623, pp. 174-193, 2020.
- [39] S. Khatibi, et al., “Modelling and implementation of virtual radio resources management for 5G Cloud RAN,” *Wireless Com Network*, no. 128, 2017. <https://doi.org/10.1186/s13638-017-0908-1>.
- [40] H. Dai, et al., “A game-theoretic learning approach to QoE-driven resource allocation scheme in 5G-enabled IoT,” *Wireless Com Network*, no. 55, 2019. <https://doi.org/10.1186/s13638-019-1359-7>.
- [41] Y. Li, X. Cao, and H. Chen, “Fully Projection-Free Proximal Stochastic Gradient Method With Optimal Convergence Rates,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 165904-165912, 2020. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3019885>.

Рекомендована кафедрою автоматизації та інтелектуальних інформаційних технологій ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 10.02.2022

Данильчук Оксана Миколаївна — канд. пед. наук, доцент, доцент кафедри прикладної математики, e-mail: oksanadommod@ukr.net .

Донецький національний університет імені Василя Стуса, Вінниця;

Ковтун В'ячеслав Васильович — д-р техн. наук, доцент, професор кафедри комп'ютерних систем управління, e-mail: kovtun_v_v@vntu.edu.ua ;

Никитенко Олена Дмитрівна — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерних систем управління, e-mail: lena260784@gmail.com ;

Нестюк Юлія Юрївна — студентка факультету інтелектуальних інформаційних технологій та автоматизації, e-mail: yunestiuk@gmail.com ;

Присяжнюк Василь Васильович — старший викладач кафедри метрології та промислової автоматики,
e-mail: pvv_vin@ukr.net .

Вінницький національний технічний університет, Вінниця

O. M. Danylchuk¹
V. V. Kovtun²
O. D. Nykytenko²
Yu. Yu. Nestiuk²
V. V. Prysiazhniuk²

Research of the Wireless Centralized Network Cluster with the Implementation of Infocommunication Interaction Sessions in Institutions in the Virtual Segments

¹Vasyl' Stus Donetsk National University;

²Vinnytsia National Technical University

The growing trend of information traffic in centralized wireless communication systems clearly proves the need for the evolution of generations of mobile communications, in particular, the transition from 4G to 5G. According to the specification, the latter should be implemented flexible services for traffic management, improving the efficiency of which is an urgent task. The article presents a mathematical model of the process of functioning of a wireless centralized network cluster, sessions of infocommunication interaction in which are implemented in independent virtual segments of the information space of the base station. The researched process is described by the Markov queuing system, the inputs of the conveyors of which are coordinated with the independent flows of incoming requests from the end devices. It is taken into account that for the maintenance of each such flow in the information environment of the base station is reserved the appropriate amount of system resources - the so-called virtual segment, the weight of which depends on the priority of the corresponding flow. The distribution of a single amount of system resources of the base station between the weighted virtual segments is carried out by a specialized management service dynamically. Within the framework of the proposed mathematical apparatus, an algorithm for forced termination of an active session of infocommunication interaction in an overloaded virtual segment and a service for managing the distribution of released system resources between the rest of virtual segments taking into account the degree of their overload. The simulation results showed that the functional mechanism of forced termination of infocommunication sessions and the system resource allocation service proposed by the authors allow the 5G base station to continue accepting new incoming requests despite the congestion of individual virtual network segments. Experiments have shown that the proposed software tools are effectively adapted to the available publicly available volume of system resources and the way to allocate within it the guaranteed amount of system resources for individual virtual network segments.

Keywords: centralized network cluster, infocommunication interaction session, virtual segment, mathematical model of accessibility, resource allocation management service.

Danylchuk Oksana M. — Cand. Sc. (Educ), Associate Professor, Associate Professor of the Chair of Applied Mathematics, e-mail: oksanadommod@ukr.net ;

Kovtun Viacheslav V. — Dr. Sc. (Eng.), Associate Professor, Professor of the Chair of Computer Control Systems, e-mail: kovtun_v_v@vntu.edu.ua ;

Nykytenko Olena D. — Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Chair of Computer Control Systems, e-mail: lena260784@gmail.com ;

Nestiuk Yuliia Yu. — Student of the Department of Intelligent Information Technology and Automation, e-mail: yynestiuk@gmail.com ;

Prysiazhniuk Vasyl V. — Senior Lecturer of the Chair of Metrology and Industrial Automation, e-mail: pvv_vin@ukr.net