

О. М. Данильчук<sup>1</sup>  
В. В. Ковтун<sup>2</sup>  
О. Д. Никитенко<sup>2</sup>  
Ю. Ю. Нестюк<sup>2</sup>  
В. В. Присяжнюк<sup>2</sup>

## МОДЕЛЮВАННЯ СЦЕНАРІЇВ РОЗВИТКУ ІНФОКОМУНІКАЦІЙНОГО ПРОЦЕСУ В БЕЗДРОТОВОМУ ЦЕНТРАЛІЗОВАНОМУ МЕРЕЖЕВОМУ КЛАСТЕРІ

<sup>1</sup>Донецький національний університет імені Василя Стуса;

<sup>2</sup>Вінницький національний технічний університет

*Запропоновані математичні моделі розвитку інфокомунікаційного процесу, який відбувається в бездротовому централізованому мережевому кластері. В досліджуваному процесі бере участь множина кінцевих мобільних пристроїв, які є суб'єктами інформаційної взаємодії з базовою станцією. Остання обслуговує інформаційні потреби суб'єктів у виділених процесах у власному інформаційному середовищі. Такий бекграунд дозволяє розглянути досліджуваний процес як марковську систему масового обслуговування з потоком нових вхідних запитів з потребами щодо бажаних обсягів системних ресурсів та потоком сервісних сигналів, надходження яких ініціює перевизначення виділених для прийнятих вхідних запитів обсягів системних ресурсів. Керування параметром у створеній системі є прийняття або відхилення нових вхідних запитів її front-end інтерфейсом. При цьому досліджуються два сценарії, які відрізняються врахуванням того, як синхронно чи асинхронно надходять до front-end інтерфейсу сервісні сигнали, отримання яких інформує про повне або часткове перевизначення обсягів системних ресурсів, задіяних для підтримки активних персоналізованих сеансів інфокомунікаційної взаємодії. Запропоновані математичні моделі розвитку таких функціональних сценаріїв дозволяють розрахувати ймовірність відхилення нового вхідного запиту та відсоток зайнятих системних ресурсів в умовах синхронної чи асинхронної зміни просторового розташування кінцевих пристроїв відносно базової станції.*

*Дослідження запропонованого математичного апарату показало, що значення показників з визначеної метрики в ситуації реалізації другого сценарію, який характеризує синхронне переміщення кінцевих пристроїв IoT відносно базової станції, не залежить від інтенсивності вхідного потоку сервісних сигналів. Дослідження впливу виду закону розподілу стохастичного характеристичного параметра надходження нового вхідного запиту на значення показників з визначеної метрики виявило об'єктивну потребу у встановленні регламенту щодо значення бажаного обсягу системних ресурсів у нових вхідних запитах.*

**Ключові слова:** математична модель, параметричний простір показників доступності, марковська система масового обслуговування, централізований мережевий кластер, сеанс інфокомунікаційної взаємодії.

### Вступ

Ще у формулюванні концепції інфокомунікаційних мереж покоління 5G в їх архітектурі закладена можливість інтеграції різних за технологічним рівнем, площею покриття та ємністю стільникових систем в єдину ефективно функціонуючу ієрархічну структуру [1]—[4]. Така інтеграція потенційно дозволяє задіяним в інформаційній взаємодії кінцевим пристроям використовувати кілька радіотехнологій одночасно, збільшуючи таким чином швидкість та надійність комунікаційних сеансів, але й виводячи задачу управління ними на принципово вищій за обчислювальною складністю рівень. Зважаючи на темпи еволюції інформаційної складової телекомунікаційних систем, наукові дослідження, спрямовані на розв'язання такої задачі є не просто актуальними, а оперативними актуальними.

На думку авторів, найперспективнішими щодо результативності інтеграції виглядають стільникові системи, засновані на технологіях LTE і Wi-Fi. Перспективними напрямками досліджень при цьому є пошук ефективних методів вибору домінуючої радіотехнології і логістичних схем управління розподілом радіоресурсів як на рівні кінцевих мобільних комунікаційних пристроїв (зокрема IoT), так і на всіх вищих ієрархічних рівнях мережевої інфраструктури. Важливим для створення таких методів є обмін не тільки безпосередньо інформаційними повідомленнями між суб'єктами телекомунікаційної взаємодії, а й сервісними повідомленнями щодо стану мережі, сформульованими в просторі лаконічної метрики якісних показників.

Інтегровальним компонентом для таких методів та метрик мають бути імітаційні математичні моделі, здатні описувати функціонування всієї екосистеми 5G в просторі та часі. Такі моделі мають адекватно описувати просторові взаємовідносини між кластерами мережі спільно з динамікою інформаційного трафіку в форматі сесій в типових умовах функціонування екосистеми 5G. В цьому контексті варто зазначити, що в екосистемі 5G постулюється відхід від традиційного для комунікаційних платформ покоління 3G/4G(LTE) способу ущільнення трафіку, який полягає у вивантаженні надлишкового трафіку мобільних абонентів в локальну мережу. Натомість пропонується ефективніше розподіляти надлишковий трафік у типовій для сучасних мегаполісів гіпернасиченій однорівневій множині LTE–Wi-Fi кластерів зі щільним перекриттям. Втім, просторо-темпоральна динаміка цього процесу також потребує ґрунтовнішого дослідження.

### Огляд аналогів

Мережі IoT можна класифікувати як глобальні мережеві інфраструктури, складені множинами підключених кінцевих пристроїв IoT, які використовують сенсорні, комунікаційні, мережеві та інформаційні технології. Інфраструктура IoT інтегрує такі різні типи суб'єктів як мережі і комунікації, «розумні» об'єкти, веб-сервіси і додатки, бізнес-моделі та процеси, з метою спільної обробки даних. Архітектура мереж IoT базується на засадах децентралізованості та гетерогенності і створюється з орієнтацією на потенціал до розширюваності, масштабованості, модульності і взаємокомунікації. Типовими кінцевими пристроями в мережах IoT є електронні апарати, мобільні пристрої і промислове устаткування. Різним класам пристроїв IoT властиві специфічні способи комунікації, з'єднання з мережею, оброблення і збереження даних. Узагальнення мережі IoT як конгломерату гетерогенних мереж показано на рис. 1. Мережі WLAN, WSN тощо зв'язують кінцеві пристрої IoT та замикаються на мережевий шлюз, який забезпечує глобальну комунікацію мережею Інтернет та здійснює локальну координацію логістики трафіку та оптимізацію доступу через механізм керування сесіями.

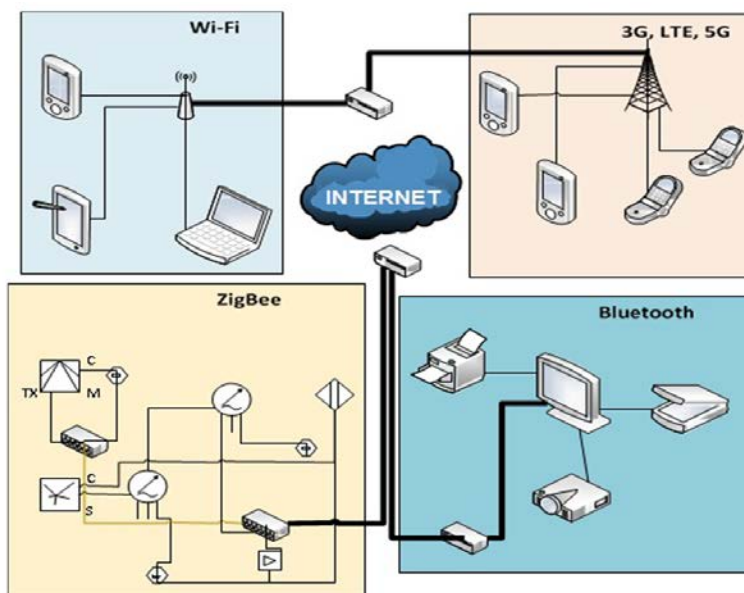


Рис. 1. Архітектура мережі IoT

З рис. 1 видно, що мережа IoT включає різні комунікаційні мережі і технології, які, в першому наближенні, можна розділити на дротові та бездротові. Як зазначалося у вступі, динамічніше еволюціонують останні. Серед протоколів, які можна вважати достатньо поширеними в сучасних

бездротових мережах IoT, виділимо RFID, NFC, ZigBee, Bluetooth, BLE, Wi-Fi (IEEE 802.11ac), 3G/4G(LTE)/5G. Технологія RFID [5]—[8] є безсумнівно поширеною в екосистемі IoT. RFID-технологія будується навколо зчитувача і мітки, яка складається з передавача і мікрочіпу з унікальним ідентифікатором. Недоліки цієї технології полягають у вузькій спеціалізації, колізіях при зчитуванні міток, інтерференції сигналів між RFID-системами, недостатнім програмним захистом процесу зчитування та передавання ідентифікатора. Технологія NFC [9]—[12] є розвитком технології RFID в напрямку універсальності елементної бази. Пристрій NFC містить як зчитувач, так і передавач з міткою, що надає йому можливість повноцінної, захищеної протоколом EMV, P2P взаємодії з іншими пристроями того ж типу. Втім, якщо процес передавання даних в цій технології і є порівняно надійним, захист безпосередньо ідентифікатора не стандартизовано. Так само як RFID, технологія NFC є вузькоспеціалізованою і не придатна для активного інформаційного трафіку. Водночас, заснована на протоколі IEEE 802.15.4 технологія ZigBee [13]—[16] дозволяє створювати енергоефективні бездротові мережі високої ємності для низькошвидкісного, проте повноцінного інформаційного обміну. На додачу, створеним за технологією ZigBee мережам IoT властива динамічна топологія та правило гарантованого отримання пакетів даних із захистом процесу їх передавання за алгоритмом AES. Критичним недоліком, який не дозволяє технології ZigBee стати універсальною, є занижка для телекомунікаційних мереж швидкість передавання інформації. Заснованим на актуальному зараз стандарті Bluetooth 4.2 спорідненим технологіям Bluetooth і BLE [17]—[21] властива енергоефективність, підтримка динамічної маршрутизації, порівняно великий радіус покриття і швидке встановлення зв'язку, опціонально захищеного за алгоритмом AES. Основний недолік цих технологій, як і у технології ZigBee, занижка для великої кількості актуальних сервісів швидкість передавання даних. Побудована на актуальному зараз сімействі стандартів IEEE 802.11 технологія Wi-Fi [22]—[24] є безсумнівно поширенішою за всі вищезгадані. Така ж поширеність властива і технології 3G/4G(LTE) [2], [3], [25]—[28]. За рівнем швидкості передавання даних та радіусом покриття ці технології перевищують всі вже згадані. Єдине, за першим критерієм Wi-Fi перевищує 3G/4G(LTE), а за другим критерієм — навпаки. Проте, ці дві технології є ресурсоемісними за вже згадані.

Саме конгломерат технологій Wi-Fi і зараз впроваджуваної 5G є реальним претендентом на універсальний засіб комунікації пристроїв IoT за умови ефективності функціонування мережевого шлюзу, підвищенням якої займається багато інженерних та наукових колективів [3], [5], [11], [14], [17], [20], [25]. Зокрема, для аналізу якості функціонування екосистеми 5G з мобільними кінцевими пристроями IoT широко застосовується імітаційне моделювання [29]—[32] і прості моделі теорії масового обслуговування [29], [30], [32] з фіксованим обсягом потреб. У дослідженнях [29], [30] пропонується аналізувати функціонування сучасної бездротової гетерогенної інфокомунікаційної мережі на моделі системи масового обслуговування з обмеженою ємністю та стохастичною інтерпретацією обсягу потреб. На відміну від моделей, описаних в [31], [32], дослідження бездротової мережі в парадигмі теорії масового обслуговування враховує процеси ініціації нових та термінації раніше ініційованих сесій, а відповідно ідентифікована стохастично функція розподілу потреб щодо системних ресурсів дозволяє сформулювати модель керування логістикою трафіку відповідно до зовнішніх умов експлуатації екосистеми 5G та її цільового призначення [33]—[38]. В представленій у дослідженнях [37], [38] експоненційній моделі кожна сесія використовує виділений їй обсяг частотних ресурсів на весь час її перебігу. Передбачається, що по завершенню сесії звільняється випадковий обсяг ресурсів, відмінний від використовуваного, адже просторова позиція і кількість задіяних в інформаційній взаємодії пристроїв-абонентів з часом змінюється. Однак згадана модель не враховує зміни в мережевій екосистемі, які можуть відбутися до завершення активної сесії.

Отже, *об'єктом* дослідження є процес інформаційної взаємодії множини суб'єктів-пристроїв IoT з базовою станцією в екосистемі 5G.

*Предметом* дослідження є математичний апарат:

– теорії ланцюгів Маркова і теорії масового обслуговування (для аналітичної формалізації об'єкту дослідження);

– теорії імовірності та математичної статистики (для аналізу результатів експериментів).

Відповідно, *метою дослідження* є аналітична формалізація процесу інформаційної взаємодії між базовою станцією і множиною кінцевих IoT пристроїв в екосистемі 5G-IoT з урахуванням двох вищеописаних сценаріїв.

## Матеріали і методи

### 1. Постановка задачі дослідження

Характеристичною ознакою як 4G-IoT, так і 5G-IoT інфокомунікаційної системи, є реалізований в інформаційному середовищі базової станції сервіс для динамічного управління системними ресурсами, спрямованими на підтримку активних сеансів інфокомунікаційної взаємодії для прийнятих вхідних запитів. Активація цього сервісу є неодмінною компонентою реакції front-end інтерфейсу базової станції на новий вхідний запит від суб'єкта, тобто пристрою IoT. Втім, такий сервіс можна вважати постійно актуальним, адже кінцеві IoT пристрої, сеанси інфокомунікаційної взаємодії для яких вже активні, можуть з часом змінювати своє просторове положення відносно базової станції. Ця обставина змушує операційне програмне забезпечення базової станції постійно моніторити активні сеанси інфокомунікаційної взаємодії так, щоб виділені для їхньої підтримки обсяги системних ресурсів знаходилися над межею термінації. При цьому підтримка активних сеансів інфокомунікаційної взаємодії є пріоритетною над ініціацією нового сеансу інфокомунікаційної взаємодії, що є неодмінною реакцією на прийняття вхідного запиту. Отже, далі вважатимемо, що обсяг системних ресурсів, задіяних на підтримку активного сеансу інфокомунікаційної взаємодії, є функцією від динамічної відстані між мобільним кінцевим IoT пристроєм та стаціонарною базовою станцією. Якщо моделюється інформаційна взаємодія базової станції з множиною кінцевих IoT пристроїв, то цей процес функціонування екосистеми 5G-IoT може розвиватися за двома базовими сценаріями: кінцеві IoT пристрої переміщуються незалежно та кінцеві IoT пристрої переміщуються синхронно.

Відповідно до щойно описаної концепції, вважатимемо, що в довільний момент часу екосистема 5G-IoT може підтримувати не більше ніж  $N$  активних сеансів інфокомунікаційної взаємодії. При цьому загальний обсяг системних ресурсів відомий і складає  $R$  у.о. Нехай в кожному вхідному запиті від кінцевого IoT пристрою до front-end інтерфейсу базової станції міститься сервісний сигнал з потребою у виділенні випадкового обсягу системних ресурсів, який дорівнює  $0 \leq r \leq R$ . Якщо на момент надходження вхідного запиту кількість активних сеансів інфокомунікаційної взаємодії в екосистемі 5G-IoT є меншою  $N$  та виконується нерівність  $r \leq R$  для вхідного запиту, то вхідний запит приймається і для нього ініціюється новий сеанс інфокомунікаційної взаємодії. В іншому випадку вхідний запит не приймається і втрачається.

Формалізуємо вищеописану концепцію у вигляді системи масового обслуговування з  $N < \infty$  каналами та наявним обсягом ресурсів  $R < \infty$ . На вхід цієї системи подається пуасонівський потік вхідних інформаційних запитів з інтенсивністю  $\lambda$ , тоді як тривалість обслуговування прийнятих вхідних запитів описується експоненціальним законом з параметром  $\mu$ . Ситуація надходження на вхід системи масового обслуговування  $i$ -го запиту з потребою на виділення  $r_i \geq 0$  у.о. системних ресурсів характеризується імовірністю  $p_i$ .

Нехай в момент надходження  $i$ -го вхідного запиту досліджувана система вже спрямовує  $r_\Sigma = \sum_{j=1}^k r_j$  у.о. системних ресурсів для підтримки  $k < N$  попере-

дньо прийнятих вхідних запитів. Тоді, якщо  $r_i \leq R - r_\Sigma$ , то  $i$ -й вхідний запит приймається, а в іншому випадку — відхиляється. Кожний прийнятий запит породжує пуасонівський потік сервісних сигналів з інтенсивністю  $\gamma$ , який характеризує настання моменту, коли обсяг системних ресурсів, виділених при ініціації сеансу інфокомунікаційної взаємодії, перестає задовольняти відповідний кінцевий IoT пристрій. В такій ситуації обсяг системних ресурсів, який виділяється на підтримку активного сеансу інфокомунікаційної взаємодії, необхідно перевизначити.

Отже, задачами дослідження є:

- формалізація математичної моделі інформаційної взаємодії між множиною суб'єктів-пристроїв IoT та базовою станцією в бездротовому централізованому мережевому кластері з урахуванням специфіки цього процесу;
- опис в базисі створеної математичної моделі двох функціональних сценаріїв, які відрізняються асинхронним чи синхронним у часі надходженням до front-end інтерфейсу базової станції сервісних сигналів, отримання яких знаменує часткове чи повне перевизначення обсягів системних ресурсів, задіяних для підтримки активних сеансів інфокомунікаційної взаємодії;
- орієнтування створеного математичного апарату на прикладне застосування шляхом визначення метрики якісних показників та аналітичної формалізації процесу їх розрахунку;
- доведення адекватності створених моделей за результатами керуваного експерименту.

## 2. Математична модель реалізації першого функціонального сценарію в бездротовому централізованому мережевому кластері

Нехай в момент часу  $t > 0$  інформаційне середовище базової станції екосистеми 5G-IoT підтримує  $\xi(t)$  сеансів інфокомунікаційної взаємодії, кожний з яких споживає  $\eta_1(t), \dots, \eta_{\xi(t)}(t)$  у.о. системних ресурсів, відповідно. В такому разі процес функціонування екосистеми 5G-IoT можна описати функціонально залежністю виду  $X(t) = (\xi(t); \eta_1(t), \dots, \eta_{\xi(t)}(t))$ . Для зменшення розмірності параметричного простору створюваної моделі замінимо в стохастичному процесі  $X(t)$  множини функцій цільового виділення системних ресурсів на функцію сумарного обсягу використуваних системних ресурсів в момент часу  $t$ :  $\delta(t) = \sum_{i=1}^{\xi(t)} \eta_i(t)$ . Далі будемо досліджувати такий стохастичний процес:  $X(t) = (\xi(t), \delta(t))$ .

Опишемо в першому наближенні динаміку стохастичного процесу  $X(t)$ . Нехай в певний момент часу екосистема 5G-IoT перебуває в стабільному стані  $(k, r)$ , де  $k < N$  — кількість активних сеансів інфокомунікаційної взаємодії, а  $r < R$  — обсяг системних ресурсів, який витрачається на їх підтримку. З імовірністю  $p_j$  до front-end інтерфейсу базової станції може поступити вхідний запит з потребою на виділення  $j$  у.о. системних ресурсів. Якщо нерівність  $j \leq R - r$  виконується, то вхідний запит буде прийнятий, а якщо ні — то втрачений. По завершенню активного сеансу інфокомунікаційної взаємодії задіяний для його обслуговування обсяг системних ресурсів звільняється. Втім, в структурі досліджуваного стохастичного процесу  $X(t)$  обсяг використуваних системних ресурсів характеризується інтегральною функцією  $\delta(t)$ , тому встановити точно, який саме обсяг системних ресурсів звільниться при термінації сеансу інфокомунікаційної взаємодії, неможливо. Отже, вважатимемо, що при термінації сеансу інфокомунікаційної взаємодії звільняється  $i$  у.о. системних ресурсів з імовірністю  $\frac{p_i p_{r-i}^{(k-1)}}{p_r^{(k)}}$ , де  $p_r^{(k)}$  —  $k$ -кратна згортка розподілу  $\{p_i\}$ ,

$i \geq 0$ . Фактично, величина  $p_r^{(k)}$  характеризує імовірність того, що сеанс інфокомунікаційної взаємодії, який термінується, використовує  $i$  у.о. системних ресурсів за умови, що всі  $k$  активних сеансів інфокомунікаційної взаємодії використовують  $i$  у.о. системних ресурсів. В момент надходження вхідного запиту один з активних сеансів інфокомунікаційної взаємодії з імовірністю  $\frac{p_i p_{r-i}^{(k-1)}}{p_r^{(k)}}$  термінується і звільняє  $i$  у.о. системних ресурсів та з імовірністю  $p_j / \sum_{s=0}^{R-r+i} p_s$  займає  $j$  у.о. системних ресурсів. Зазначимо, що це не гарантує того, що вхідний запит буде прийнятий, адже пріоритетною є підтримка активних сеансів інфокомунікаційної взаємодії.

На основі сказаного, простір станів екосистема 5G-IoT опишемо множиною  $\tilde{X} = \bigcup_{k=0}^N \tilde{X}_k$ , де  $\tilde{X}_k = \{(k, r) : 0 \leq r \leq R, p_r^{(k)} > 0\}$ . Впорядкуємо елементи множини  $\{\tilde{X}_k\}$ ,  $0 \leq k \leq N$ , за зростанням обсягів використуваних системних ресурсів і введемо індексну функцію  $I(k, r)$ , значення якої дорівнює порядковому номеру стана  $(k, r)$  у впорядкованій множині  $\{\tilde{X}_k\}$ . Матриця інтенсивностей переходів  $A = [a((i, j), (k, r))]$  стохастичного процесу  $\tilde{X}(t)$  є блочною тридіагональною матрицею з діагональними блоками  $\Psi_0, \Psi_1, \dots, \Psi_N$ , наддіагональними блоками  $\Lambda_1, \dots, \Lambda_N$  і піддіагональними блоками  $M_0, M_1, \dots, M_N$ , елементи  $\{\Psi_n\} \forall n = \overline{1, N}$ ,  $\{\Lambda_n\} \forall 2 \leq n \leq N$ ,  $\{M_n\} \forall n = \overline{1, N}$ , яких визначаються, відповідно, за такими виразами:

$$\psi_n(I(n,i), I(n,j)) = \begin{cases} n\gamma \sum_{s=0}^i \frac{p_s p_{i-s}^{(n-1)} p_{j-i+s}}{p_i^{(n)} \sum_{k=0}^{R-i+s} p_k} \forall i < j, \\ -\left(n\mu + n\gamma + \lambda \sum_{k=0}^{R-i} p_k\right) \forall i = j, \quad (n,i), (n,j) \in \tilde{X}_n, \quad n = \overline{1, N-1}, \\ n\gamma \sum_{s=i-j}^i \frac{p_s p_{i-s}^{(n-1)} p_{j-i+s}}{p_i^{(n)} \sum_{k=0}^{R-i+s} p_k} \forall i > j; \end{cases} \quad (1)$$

$$\lambda_n(I(n-1,i), I(n,j)) = \begin{cases} \lambda p_{j-i} \forall i \leq j \leq R, \\ 0 \forall j < i, \end{cases} \quad (n-1,i) \in \tilde{X}_{n-1}, \quad (n,i) \in \tilde{X}_n, \quad n = \overline{2, N}; \quad (2)$$

$$\mu_n(I(n+1,i), I(n,j)) = \begin{cases} (n+1)\mu \frac{p_{i-j} - p_j^{(n)}}{p_i^{(n+1)}} \forall i \leq j \leq R, \\ 0 \forall j > i, \end{cases} \quad (n+1,i) \in \tilde{X}_{n+1}, \quad (n,j) \in \tilde{X}_n, \quad n = \overline{1, N-1}; \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \Psi_0 &= -\lambda \sum_{j=0}^R p_j, \\ \Lambda_1 &= (\lambda p_0, \dots, \lambda p_r), \quad \Psi_N(I(N,i), I(N,j)) = \begin{cases} N\gamma \sum_{s=0}^i \frac{p_s p_{i-s}^{(N-1)} p_{j-i+s}}{p_i^{(N)} \sum_{k=0}^{R-i+s} p_k} \forall i < j, \\ -(N\mu + N\gamma) \forall i = j, \\ N\gamma \sum_{s=i-j}^i \frac{p_s p_{i-s}^{(N-1)} p_{j-i+s}}{p_i^{(N)} \sum_{k=0}^{R-i+s} p_k} \forall i > j, \end{cases} \quad (N,i), (N,j) \in \tilde{X}_N. \quad (4) \\ M_0 &= (\mu, \dots, \mu)^T, \end{aligned}$$

Прикладного значення вирази (1)–(4) набувають у разі їхнього представлення у формі системи рівнянь рівноваги

$$\left\{ \begin{aligned} &\left(k\mu + k\gamma + \lambda \sum_{j=0}^{R-r} p_j\right) q_k(r) = \lambda \sum_{j \geq 0, (k-1, r-j) \in \tilde{X}_{k-1}} q_{k-1}(r-j) p_j + (k+1)\mu \sum_{j \geq 0, (k+1, r+j) \in \tilde{X}_{k+1}} \frac{q_{k+1}(r+j) p_j p_r^{(k)}}{p_{j+r}^{(k+1)}} + \\ &+ k\gamma \sum_{j: (k,j) \in \tilde{X}_k} q_k(j) \sum_{i=\max(0, j-r)}^j \frac{p_i p_{j-1}^{(k-1)} p_{r-j+i}}{p_j^{(k)} \sum_{s=0}^{R-j+i} p_s} \quad \forall 1 \leq k \leq N-1, (k,r) \in \tilde{X}_k, \\ &(N\mu + k\gamma) q_N(r) = \lambda \sum_{j \geq 0, (N-1, r-j) \in \tilde{X}_{N-1}} q_{N-1}(r-j) p_j + N\gamma \times \sum_{j: (N,j) \in \tilde{X}_N} q_N(j) \sum_{i=\max(0, j-r)}^j \frac{p_i p_{j-1}^{(N-1)} p_{r-j+i}}{p_j^{(N)} \sum_{s=0}^{R-j+i} p_s} \quad \forall (N,r) \in \tilde{X}_N, \\ &\lambda q_0 \sum_{j=0}^R p_j = \mu \sum_{j: (1,j) \in \tilde{X}_1} q_1(j), \end{aligned} \right. \quad (5)$$

розв'язком якої є стаціонарні імовірності

$$q_0 = \lim_{t \rightarrow \infty} P\{\xi(t) = 0\}, \quad q_k(r) = \lim_{t \rightarrow \infty} P\{\xi(t) = k, \delta(t) = r\}, \quad (k,r) \in \tilde{X}_k. \quad (6)$$

Чисельні значення стаціонарних імовірностей (6) можна обчислити за допомогою LU-розкладу [39], [40] системи рівнянь рівноваги (5), для чого представимо останню в матричній формі

$$\begin{aligned} q^T A &= 0^T, \\ q^T \cdot I &= 1, \end{aligned} \quad (7)$$

де  $I$  — одинична матриця відповідної розмірності. Позначимо підвектори стаціонарних імовірностей як  $q_0 = \{q_0\}$ ,  $q_k = \{q_k(r)\} \forall 1 \leq k \leq N$ , тоді, з урахуванням блочно-тридіагональної структури матриці інтенсивностей переходів  $A$ , система рівнянь (7) набуде такого вигляду:

$$\begin{aligned} q_0 \Psi_0 - q_1 M_0 &= 0, \\ q_i \Psi_i - q_{i+1} M_i - q_{i-1} \Lambda_i &= 0, 1 \leq i \leq N-1, \\ q_N \Psi_N - q_{N-1} \Lambda_N &= 0. \end{aligned} \quad (8)$$

Система рівнянь (8) адаптована до застосування методу LU-розкладу, який дозволяє розрахувати стаціонарні імовірності (6) для системи масового обслуговування, яка моделює реалізацію першого функціонального сценарію в конкретному бездротовому централізованому мережевому кластері.

### 3. Математична модель реалізації другого функціонального сценарію в бездротовому централізованому мережевому кластері

Дослідимо стохастичний процес  $X(t)$  в умовах, коли в бездротовому централізованому мережевому кластері реалізується другий функціональний сценарій, який передбачає, що в певний момент часу всі кінцеві IoT пристрої здійснюють синхронне переміщення відносно базової станції. Такий розвиток подій спричиняє одночасний вплив на всі активні сеанси інфокомунікаційної взаємодії в інформаційному середовищі досліджуваної екосистеми, спричиняючи необхідність перевизначення обсягів системних ресурсів, використовуваних для підтримки кожного з них. Зауважимо, що перевизначення необхідно реалізувати так, щоби уникнути передчасної термінації активних сеансів інфокомунікаційної взаємодії.

Візьмемо як базову, представлену в частині 2, математичну модель реалізації першого функціонального сценарію в екосистеми 5G-IoT. Розвинемо її, припустивши, що в певний момент часу до front-end інтерфейсу базової станції надходить пуасонівський потік сервісних сигналів з інтенсивністю  $\gamma$ , отримання якого ініціює сценарій перерозподілу системних ресурсів між всіма активними сеансами інфокомунікаційної взаємодії. Позначимо цей процес як  $X^*(t) = (\xi(t), \delta(t))$ , де  $\xi(t)$  — кількість активних сеансів інфокомунікаційної взаємодії в екосистеми 5G-IoT в момент часу  $t$ , для підтримки яких залучається сумарно  $\delta(t)$  у.о. системних ресурсів.

Простір станів стохастичного процесу  $X^*(t)$  ідентичний формалізованому в частині 2 для стохастичного процесу  $\tilde{X}(t)$ . Обслуговування нових запитів і термінація активних сеансів інфокомунікаційної взаємодії в стохастичних процесах  $X^*(t)$  і  $\tilde{X}(t)$  також відбувається ідентично. Відмінність між цими стохастичними процесами проявляється тоді, коли пуасонівський потік сервісних сигналів для прийнятих вхідних запитів набуває інтенсивності  $\gamma$ . В цей момент в бездротовому централізованому мережевому кластері з імовірністю  $\frac{p_r^{(k)}}{\sum_{i=0}^R p_i^{(k)}}$  відбувається перехід зі стану  $(k, j)$  в стан  $(k, r)$ . Ця подія відповідним чином відбивається на системі рівнянь рівноваги стохастичного процесу  $X^*(t)$

$$\left\{ \begin{aligned} &\left( k\mu + \gamma + \lambda \sum_{j=0}^{R-r} p_j \right) q_k^*(r) = \lambda \sum_{j \geq 0, (k-1, r-j) \in \tilde{X}_{k-1}} q_{k-1}^*(r-j) p_j + (k+1)\mu \sum_{j \geq 0, (k+1, r+j) \in \tilde{X}_{k+1}} q_{k+1}^*(r+j) \frac{p_j p_r^{(k)}}{p_{j+r}^{(k+1)}} + \\ &\quad + \gamma \sum_{i=0}^R q_k^*(j) \frac{p_r^{(k)}}{\sum_{i=0}^R p_i^{(k)}} \forall 1 \leq k \leq N-1, (k, r) \in \tilde{X}_k, \\ &(N\mu + \gamma) q_N^*(r) = \lambda \sum_{j \geq 0, (N-1, r-j) \in \tilde{X}_{N-1}} q_{N-1}^*(r-j) p_j + \gamma \sum_{j(N, r) \in \tilde{X}_N} q_N^*(j) \frac{p_r^{(N)}}{\sum_{i=0}^R p_i^{(N)}} \forall (N, r) \in \tilde{X}_N, \\ &\lambda q_0^* \sum_{j=0}^R p_j = \mu \sum_{j(1, j) \in \tilde{X}_1} q_1^*(j), \end{aligned} \right. \quad (9)$$

розв'язком якої є стаціонарні ймовірності

$$q_0^* = \lim_{t \rightarrow \infty} P\{\xi(t) = 0\}, \quad q_k^*(r) = \lim_{t \rightarrow \infty} P\{\xi(t) = k, \delta(t) = r\}, \quad (k, r) \in \tilde{X}_k. \quad (10)$$

Якщо підставити вирази (10) в систему рівнянь рівноваги (9), то після послідовності аналітичних перетворень отримаємо:

$$q_0^* = \frac{1}{G(N, R)}; \quad q_k^*(r) = q_0 p^k p_r^{(k)} \frac{1}{k!}, \quad (11)$$

де  $G(N, R) = \sum_{k=0}^N \sum_{r=0}^R p^k p_r^{(k)} \frac{1}{k!}$  — нормувальна константа.

З виразів (11) видно, що стаціонарні ймовірності для системи масового обслуговування, яка описує реалізацію другого функціонального сценарію в екосистемі 5G-IoT, не залежать від інтенсивності  $\gamma$ , що доводить орієнтованість стохастичного процесу  $X^*(t)$  на першочергову підтримку вже прийнятих вхідних запитів перед прийняттям нових вхідних запитів.

#### 4. Результати експериментів та їх обговорення

Дослідимо процес реалізації першого функціонального сценарію в бездротовому централізованому мережевому кластері на основі запропонованої в частині 2 математичної моделі. Стаціонарні ймовірності (6) знайдемо, розв'язавши представлену в матричній формі (8) систему рівнянь рівноваги (5). За відомих стаціонарних ймовірностей (6), ймовірність втрати вхідного запиту  $B$  і середній обсяг використовуваних системних ресурсів  $b$  для процесу реалізації першого функціонального сценарію в бездротовому централізованому мережевому кластері визначимо як

$$B_1 = 1 - \sum_{k=0}^{N-1} \sum_{r:(k,r) \in \tilde{X}_k} q_k(r) \sum_{j=0}^{R-r} p_j; \quad (12)$$

$$b_1 = 1 - \sum_{k=0}^N \sum_{r:(k,r) \in \tilde{X}_k} r q_k(r). \quad (13)$$

Аналогічно дослідимо процес реалізації другого функціонального сценарію в бездротовому централізованому мережевому кластері на основі запропонованої в частині 3.3 математичної моделі. Грунтуючись на виразах (11), визначимо аналітично такі характеристичні індикатори досліджуваного процесу як ймовірність втрати вхідного запиту  $B$  і середній обсяг використовуваних системних ресурсів  $b$ :

$$B_2 = 1 - \frac{1}{G(N, R)} \sum_{j=0}^R p_j G(N, R - j); \quad (14)$$

$$b_2 = \frac{1}{G(N, R)} \sum_{j=1}^R p_j G(N, R - j). \quad (15)$$

З аналізу реального трафіку в бездротовому централізованому мережевому кластері далі вважатимемо, що ймовірність прийняття базовою станцією нового вхідного запиту  $p$  розподілена відповідно до геометричного  $GEM(p)$  або біноміального  $BIN(r, p)$  законів розподілу. Для дослідження в метриці  $\{B, b\}$  реакції математичних моделей реалізації першого або другого функціональних сценаріїв в бездротовому централізованому мережевому кластері на зміну інтенсивності потоку вхідних сервісних сигналів  $\gamma$  і керовані параметри законів розподілу ймовірності прийняття базовою станцією нового вхідного запиту  $p$  використовуватимемо такі:

– для біноміального закону розподілу  $BIN(r, p)$  керовані параметри знаходитимуться в діапазонах  $0 \leq r \leq R$  та  $0 \leq p \leq 1$ , де параметр  $p_i = \binom{r}{i} p^i (1-p)^{r-i}$  характеризує ймовірність того, що для прийняття нового вхідного запиту необхідно виділити  $i$  у.о. системних ресурсів,  $0 \leq i \leq r$ ,  $p = \bar{m}/r$ , де  $\bar{m}$  — математичне сподівання стохастичної величини  $p$ ;



– для геометричного закону розподілу  $GEM(p)$  керований параметр знаходиться в діапазоні  $0 \leq p \leq 1$ , де параметр  $p_i = p^i(1-p)$  характеризує імовірність того, що для прийняття нового вхідного запиту необхідно буде виділити  $i, 0 \leq i \leq r$  у.о. системних ресурсів,  $p = 1/(1+\bar{m})$ .

Для обчислення за виразами (1)–(4) необхідних для розв’язання системи рівнянь рівноваги (5) елементів матриць  $\Psi, \Lambda, M \in A$  визначимо всі  $k$ -кратні згортки  $p_r^{(k)}$ , які характеризують імовірності того, що  $k$  прийнятих вхідних запитів використовують  $j$  у.о. системних ресурсів. Залежно від виду закону розподілу згортки  $p_r^{(k)}$  аналітично опишемо виразами:

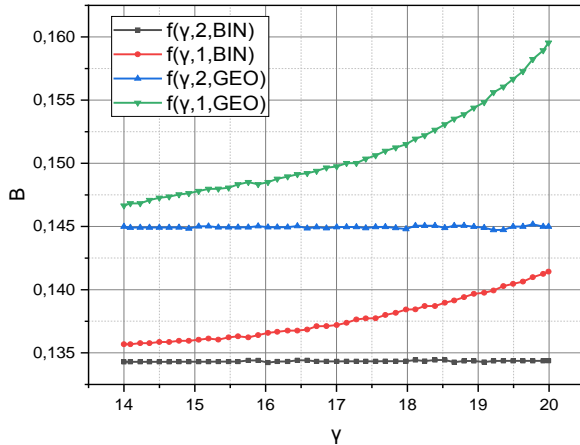


Рис. 2. Емпірично отримані функціональні залежності  $\{B_1^{BIN}, B_1^{GEO}, B_2^{BIN}, B_2^{GEO}\} = f(\gamma)$  для досліджуваної екосистеми 5G-IoT

нція екосистеми 5G-IoT здатна була обслуговувати одночасно до 1000 сеансів інфокомунікаційної взаємодії, залучаючи для їхньої підтримки до 100% всіх системних ресурсів:  $N = 1000, R = 100$ . Середня тривалість сеансу інфокомунікаційної взаємодії  $\mu$  дорівнювала 60 с, а середня кількість вхідних запитів до front-end інтерфейсу базової станції  $\lambda$  становила 16.

На рис. 2 показані емпірично отримані функціональні залежності  $\{B_1^{BIN}, B_1^{GEO}, B_2^{BIN}, B_2^{GEO}\} = f(\gamma)$ , де  $\gamma$  — інтенсивність надходження сервісних сигналів для прийнятих вхідних запитів,  $B$  — імовірність втрати нового вхідного запиту,  $\{1, 2\}$  — номер моделі процесу реалізації відповідного функціонального сценарію в досліджуваному бездротовому централізованому мережевому кластері,  $\{BIN, GEO\}$  — вид закону розподілу стохастичної величини  $p$ .

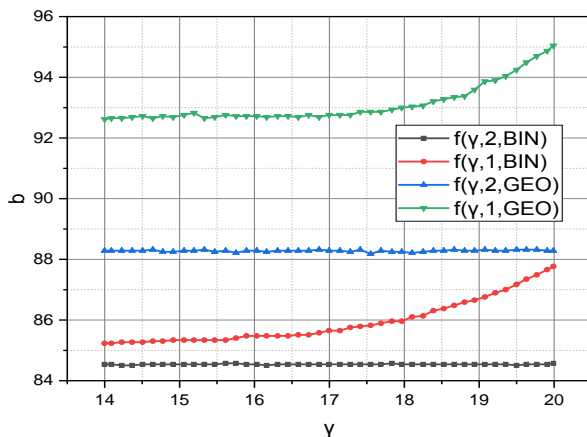


Рис. 3. Емпірично отримані функціональні залежності  $\{b_1^{BIN}, b_1^{GEO}, b_2^{BIN}, b_2^{GEO}\} = f(\gamma)$  для досліджуваної екосистеми 5G-IoT

Відповідно, на рис. 3 показані емпірично отримані функціональні залежності  $\{b_1^{BIN}, b_1^{GEO}, b_2^{BIN}, b_2^{GEO}\} = f(\gamma)$ , де  $b$  — середній обсяг використовуваних системних ресурсів.

– для біноміального закону розподілу:

$$p_j^{(k)} = \binom{kr}{j} p^j (1-p)^{kr-j};$$

– для геометричного закону розподілу:

$$p_j^{(k)} = \binom{k+j-1}{k} p^j (1-p)^k.$$

Значення керованих параметрів біноміального і геометричного законів розподілу підбиралися так, щоби математичне сподівання  $\bar{m}$  було однаковим. Емпірично встановлено, що максимальний обсяг необхідних системних ресурсів для одного вхідного запиту  $r$  за біноміального закону розподілу дорівнює 18. Відповідно, математичне сподівання  $\bar{m}$  для біноміального, а отже і для геометричного, законів розподілу дорівнює 5,4.

За умов проведення експерименту базова станція екосистеми 5G-IoT здатна була обслуговувати одночасно до 1000 сеансів інфокомунікаційної взаємодії, залучаючи для їхньої підтримки до 100% всіх системних ресурсів:  $N = 1000, R = 100$ . Середня тривалість сеансу інфокомунікаційної взаємодії  $\mu$  дорівнювала 60 с, а середня кількість вхідних запитів до front-end інтерфейсу базової станції  $\lambda$  становила 16.

Відповідно, на рис. 3 показані емпірично отримані функціональні залежності

$$\{b_1^{BIN}, b_1^{GEO}, b_2^{BIN}, b_2^{GEO}\} = f(\gamma),$$

де  $b$  — середній обсяг використовуваних системних ресурсів.

Аналіз показаних на рис. 2 і 3 експериментальних результатів розпочнемо, зазначивши факт, що втілена у вираз (11) гіпотеза, що стаціонарні імовірності для системи масового обслуговування, яка описує реалізацію другого функціонального сценарію в екосистемі 5G-IoT, не залежать від інтенсивності  $\gamma$ , що свідчить про орієнтованість стохастичного процесу  $X^*(t)$  на першочергову підтримку вже прийнятих вхідних запитів перед прийняттям нових вхідних запитів, знайшла своє експериментальне підтвердження. Видно,

що графіки функцій  $B = f(\gamma, 2, \{BIN, GEO\})$  і  $b = f(\gamma, 2, \{BIN, GEO\})$  не залежать від зміни інтенсивності надходження потоку сервісних сигналів  $\gamma$ . Водночас, значення цих функцій залежить від вихідних параметрів досліджуваної екосистеми 5G-IoT та виду закону розподілу стохастичного параметра  $p$ , який характеризує ймовірність прийняття базовою станцією нового вхідного запиту.

Типовішим для екосистеми 5G-IoT є перший функціональний сценарій, в якому ситуації, за яких вимоги щодо перевизначення обсягів системних ресурсів, які виділяються для підтримки активних сеансів інфокомунікаційної взаємодії для прийнятих вхідних запитів, є ординарними, проте незалежними. Втім, орієнтованість представлених у частині 2 математичних моделей на першочергову підтримку прийнятих вхідних запитів перед прийняттям нових вхідних запитів чітко відслідковується в нелінійно зростаючих графіках функцій  $B = f(\gamma, 1, \{BIN, GEO\})$  і  $b = f(\gamma, 1, \{BIN, GEO\})$ . Нелінійний характер цих графіків можна пояснити тим, що у виразах (12), (13) для обчислення стаціонарних імовірностей  $q_k(r)$  на основі матричного представлення системи рівнянь рівноваги (8)  $LU$ -методом використовуються ступеневі обчислювальні операції.

Також, аналізуючи графіки  $B = f(\gamma, 1, \{BIN, GEO\})$  і  $b = f(\gamma, 1, \{BIN, GEO\})$ , можна стверджувати, що закон розподілу стохастичної величини надходження нового вхідного запиту  $p$  суттєво впливає на значення якісних параметрів метрики  $\{B, b\}$  для всіх досліджених значень  $\gamma$ . За біноміального розподілу  $BIN(r, p)$  значення імовірності  $p$  визначається відхиленням вказаного в новому вхідному запиті бажаного обсягу системних ресурсів  $i$  від заданого значення  $r$ . Таким чином, базова станція в бездротовому централізованому мережевому кластері орієнтується на прийняття нових вхідних запитів, значення параметру  $i$  для яких наближається до заданого значення  $r$ . Така детермінованість дозволяє зменшити обсяг зайнятих системних ресурсів на понад 9% порівняно з варіантом розподілу значення параметра  $p$  за геометричним розподілом  $GEM(p)$  для всього дослідженого діапазону значень  $\gamma$ . Також за біноміального, а не геометричного, розподілу значення параметра  $p$  в досліджуваному бездротовому централізованому мережевому кластері останньому властива помітно менша імовірність втрати нового вхідного запиту  $B$  для всього дослідженого діапазону значень  $\gamma$ . Отже, необхідність встановлення регламенту щодо значення бажаного обсягу системних ресурсів у нових вхідних запитах можна вважати теоретично обґрунтованою і емпірично доведеною.

### Висновки

Постійне зростання кількості каналів інформаційної взаємодії в екосистемі IoT синхронно зі зростанням інформаційної насиченості цієї взаємодії спонукає до пришвидшення еволюції технологічних платформ мобільної телекомунікації. Природно, що швидкість та вартість цього еволюційного процесу активізує науковців до попереднього теоретичного обґрунтування доцільності потенційно перспективних технологічних рішень. Відповідно, предметно-орієнтоване математичне моделювання процесів інформаційної взаємодії в бездротовому централізованому мережевому кластері на часі є актуальним.

В статті вперше запропоновані математичні моделі процесу інформаційної взаємодії між множиною суб'єктів-пристроїв IoT та базовою станцією в бездротовому централізованому мережевому кластері. На відміну від існуючих, досліджуваний процес представлено системою масового обслуговування з потоком нових вхідних запитів з потребами щодо бажаних обсягів системних ресурсів та потоком сервісних сигналів, надходження яких ініціює перевизначення виділених для прийнятих вхідних запитів обсягів системних ресурсів. Керованим параметром в створеній системі масового обслуговування є прийняття або відхилення нових вхідних запитів за умови пріоритетності підтримки активних сеансів інфокомунікаційної взаємодії, ініційованих для прийнятих вхідних запитів. При цьому враховується два функціональних сценарії, які відрізняються тим, як асинхронно чи синхронно у часі надходять до front-end інтерфейсу базової станції сервісні сигнали, отримання яких знаменує часткове чи повне перевизначення обсягів системних ресурсів, задіяних для підтримки активних сеансів інфокомунікаційної взаємодії. Формалізовані в базисі єдиної системи масового обслуговування математичні моделі розвитку цих функціональних сценаріїв дозволяють розрахувати ймовірність відхилення нового вхідного запиту та відсоток зайнятих системних

ресурсів, об'єднаних в метрику якісних показників, в умовах асинхронної чи синхронної зміни просторового розташування відносно базової станції кінцевих пристроїв IoT, прийняті вхідні запити від яких активні в бездротовому централізованому мережевому кластері.

Дослідження створених математичних моделей показало, що значення якісних показників у випадку реалізації другого сценарію, якому властиве синхронне переміщення кінцевих пристроїв IoT відносно базової станції, не залежить від інтенсивності потоку надходження сервісних сигналів. З показаних на рис. 3 графіків  $b = f(\gamma, 1, \{BIN, GEO\})$  видно, що зі зростанням інтенсивності потоку сервісних сигналів  $\gamma$  на 40 % відносно початкового значення обсяг зайнятих системних ресурсів зростає на 3 %. Враховуючи, що при цьому, згідно з показаними на рис. 2 графіками  $B = f(\gamma, 1, \{BIN, GEO\})$ , імовірність втрати нового вхідного запиту зростає в середньому на 10 % відносно початкового значення  $\gamma = 14$ , можна стверджувати, що зі зростанням значення  $\gamma$  імовірність втрати нового вхідного запиту  $B$  досягне одиниці раніше ніж в бездротовому централізованому мережевому кластері закінчатися вільні системні ресурси.

Експерименти показали, що попри орієнтованість другого функціонального сценарію на підтримку прийнятих вхідних запитів, базова станція залишається стабільно доступною для прийняття нових вхідних запитів. Отже, другий функціональний сценарій можна вважати аналогом існуючого в сучасних операційних системах на базі процесорів x86&x64 «безпечного» режиму. Зокрема, другий сценарій можна застосовувати у разі підозри реалізації DDoS атаки на базову станцію зі сторони множини кінцевих пристроїв IoT. Ознакою такої атаки може слугувати різке зростання значення параметра  $\gamma$ .

Подальші дослідження планується спрямувати на підвищення обчислювальної ефективності методу розрахунку значень аргументованої вище метрики якісних показників.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] L. Chettri, and R. Bera, "A Comprehensive Survey on Internet of Things (IoT) Toward 5G Wireless Systems," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 7, no. 1, pp. 16-32, 2020. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2019.2948888>.
- [2] K. Shafique, B. A. Khawaja, F. Sabir, S. Qazi, and M. Mustaqim, "Internet of Things (IoT) for Next-Generation Smart Systems: A Review of Current Challenges, Future Trends and Prospects for Emerging 5G-IoT Scenarios," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 23022-23040, 2020. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2970118>.
- [3] A. Ghosh, A. Maeder, M. Baker, and D. Chandramouli, "5G Evolution: A View on 5G Cellular Technology Beyond 3GPP Release 15," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 127639-127651, 2019. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2939938>.
- [4] A. A. R. Alsaedy, and E. K. P. Chong, "Mobility Management for 5G IoT Devices: Improving Power Consumption With Lightweight Signaling Overhead," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 6, no. 5, pp. 8237-8247, 2019. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2019.2920628>.
- [5] K. Fan, W. Jiang, H. Li, and Y. Yang, "Lightweight RFID Protocol for Medical Privacy Protection in IoT," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 14, no. 4, pp. 1656-1665, 2018. <https://doi.org/10.1109/TII.2018.2794996>.
- [6] M. Hosseinzadeh, et al. "A New Strong Adversary Model for RFID Authentication Protocols," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 125029-125045, 2020. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3007771>.
- [7] K. Ding, and P. Jiang, "RFID-based production data analysis in an IoT-enabled smart job-shop," *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, vol. 5, no. 1, pp. 128-138, 2018. <https://doi.org/10.1109/JAS.2017.7510418>.
- [8] V. Sharma, and M. Hashmi, "On the Seamless Integration and Co-Existence of Chipless RFID in Broad IoT Framework," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 69839-69849, 2021. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3078318>.
- [9] D. Sethia, D. Gupta, and H. Saran, "NFC Secure Element-Based Mutual Authentication and Attestation for IoT Access. In *IEEE Transactions on Consumer Electronics*," vol. 64, no. 4, pp. 470-479, 2018. <https://doi.org/10.1109/TCE.2018.2873181>.
- [10] T. Ulz, T. Pieber, A. Höller, S. Haas, and C. Steger, "Secured and Easy-to-Use NFC-Based Device Configuration for the Internet of Things," *IEEE Journal of Radio Frequency Identification*, vol. 1, no. 1, pp. 75-84, 2017. <https://doi.org/10.1109/JRFID.2017.2745510>.
- [11] F. K. Shaikh, S. Zeadally, and E. Exposito, "Enabling Technologies for Green Internet of Things," *IEEE Systems Journal*, vol. 11, no. 2, pp. 983-994, 2017. <https://doi.org/10.1109/JSYST.2015.2415194>.
- [12] B. A. Alzahrani, K. Mahmood and S. Kumari, "Lightweight Authentication Protocol for NFC Based Anti-Counterfeiting System in IoT Infrastructure," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 76357-76367, 2020. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2989305>.
- [13] E. D. Ngangue Ndi, and S. Cherkaoui, "On Enhancing Technology Coexistence in the IoT Era: ZigBee and 802.11 Case," In *IEEE Access*, vol. 4, pp. 1835-1844, 2016. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2016.2553150>.
- [14] K. Lounis, and M. Zulkernine, "Attacks and Defenses in Short-Range Wireless Technologies for IoT," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 88892-88932, 2020. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2993553>.
- [15] H. Qin, B. Cao, J. He, X. Xiao, W. Chen, and Y. Peng, "Cross-Interface Scheduling Toward Energy-Efficient Device-to-Gateway Communications in IoT," In *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 7, no. 3, pp. 2247-2262, 2020. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2019.2958612>.

- [16] W. Jiang, Z. Yin, R. Liu, Z. Li, S. M. Kim, and T. He, "Boosting the Bitrate of Cross-Technology Communication on Commodity IoT Devices," *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 27, no. 3, pp. 1069-1083, 2019. <https://doi.org/10.1109/TNET.2019.2913980>.
- [17] J. F. Ensworth, and M. S. Reynolds, "BLE-Backscatter: Ultralow-Power IoT Nodes Compatible With Bluetooth 4.0 Low Energy (BLE) Smartphones and Tablets," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 65, no. 9, pp. 3360-3368, 2017. <https://doi.org/10.1109/TMTT.2017.2687866>.
- [18] S. R. Hussain, S. Mehnaz, S. Nirjon, and E. Bertino, "Secure Seamless Bluetooth Low Energy Connection Migration for Unmodified IoT Devices," *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 17, no. 4, pp. 927-944, 2018. <https://doi.org/10.1109/TMC.2017.2739742>.
- [19] K. Lounis, and M. Zulkernine, "Attacks and Defenses in Short-Range Wireless Technologies for IoT," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 88892-88932, 2020. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2993553>.
- [20] R. Rondón, A. Mahmood, S. Grimaldi, and M. Gidlund, "Understanding the Performance of Bluetooth Mesh: Reliability, Delay, and Scalability Analysis," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 7, no. 3, pp. 2089-2101, 2020. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2019.2960248>.
- [21] J. Lovón-Melgarejo, M. Castillo-Cara, O. Huarcaya-Canal, L. Orozco-Barbosa, and I. García-Varea, "Comparative Study of Supervised Learning and Metaheuristic Algorithms for the Development of Bluetooth-Based Indoor Localization Mechanisms," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 26123-26135, 2019. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2899736>.
- [22] H. Pirayesh, P. K. Sangdeh, and H. Zeng, "Coexistence of Wi-Fi and IoT Communications in WLANs," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 7, no. 8, pp. 7495-7505, 2020. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2020.2986110>.
- [23] W. Wang, Y. Chen, L. Wang, and Q. Zhang, "Sampleless Wi-Fi: Bringing Low Power to Wi-Fi Communications," *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 25, no. 3, pp. 1663-1672, 2017. <https://doi.org/10.1109/TNET.2016.2643160>.
- [24] K. Lounis, and M. Zulkernine, "Attacks and Defenses in Short-Range Wireless Technologies for IoT," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 88892-88932, 2020. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2993553>.
- [25] M. R. Palattella, et al. "Internet of Things in the 5G Era: Enablers, Architecture, and Business Models," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 34, no. 3, pp. 510-527, 2016. <https://doi.org/10.1109/JSAC.2016.2525418>.
- [26] X. Ge, R. Zhou, and Q. Li, "5G NFV-Based Tactile Internet for Mission-Critical IoT Services," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 7, no. 7, pp. 6150-6163, 2020. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2019.2958063>.
- [27] G. A. Akpakwu, B. J. Silva, G. P. Hancke, and A. M. Abu-Mahfouz, "A Survey on 5G Networks for the Internet of Things: Communication Technologies and Challenges," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 3619-3647, 2018. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2779844>.
- [28] Y. Lin, T. Huang, and S. Tsai, "Enhancing 5G/IoT Transport Security Through Content Permutation," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 94293-94299, 2019. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2926479>.
- [29] L. Yu, Z. Li, J. Liu, and R. Zhou, "Resources Sharing in 5G Networks: Learning-Enabled Incentives and Coalitional Games," *IEEE Systems Journal*, vol. 15, no. 1, pp. 226-237, 2021. <https://doi.org/10.1109/JSYST.2019.2958890>.
- [30] C. She, Y. Duan, D. Zhao, T. Q. S. Quek, Y. Li, and B. Vucetic, "Cross-Layer Design for Mission-Critical IoT in Mobile Edge Computing Systems," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 6, no. 6, pp. 9360-9374, 2019. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2019.2930983>.
- [31] A. Baz, A. A. Al-Naja, and M. Baz, "Statistical model for IoT/5G networks," in *Seventh International Conference on Ubiquitous and Future Networks*, 2015, pp. 109-111. <https://doi.org/10.1109/ICUFN.2015.7182511>.
- [32] C. Tsai, and M. Moh, "Load balancing in 5G cloud radio access networks supporting IoT communications for smart communities," in *IEEE International Symposium on Signal Processing and Information Technology (ISSPIT)*, 2017, pp. 259-264. <https://doi.org/10.1109/ISSPIT.2017.8388652>.
- [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), Deggen-dorf, 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] M. Mbaye, M. Diallo, and M. Mboup, "LU-Based Beamforming Schemes for MIMO Systems," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 66, no. 3, pp. 2214-2222, 2017. <https://doi.org/10.1109/TVT.2016.2573046>.
- [40] J. Chen, J. Hu, and J. Zhou, "Hardware and Energy-Efficient Stochastic LU Decomposition Scheme for MIMO Receivers," *IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems*, vol. 24, no. 4, pp. 1391-1401, 2016. <https://doi.org/10.1109/TVLSI.2015.2446481>.

**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. Danylchuk<sup>1</sup>**  
**V. V. Kovtun<sup>2</sup>**  
**O. D. Nykytenko<sup>2</sup>**  
**Yu. Yu. Nestiuk<sup>2</sup>**  
**V. V. Prysiazhniuk<sup>2</sup>**

## **Simulation of Infocommunications Process Development Scenarios in Wireless Centralized Network Cluster**

<sup>1</sup>Vasyl' Stus Donetsk National University;

<sup>2</sup>Vinnitsia National Technical University

*The article presents mathematical models of the development of the infocommunication process that takes place in a wireless centralized network cluster. Many end mobile devices are involved in the research process, which are the subjects of information interaction with the base station. The later serves the information needs of the subjects in the selected processes in their own information environment. This background allows us to consider the studied process as a Markov queuing system with a flow of new incoming requests with needs for the desired amount of system resources and a flow of service signals, the receipt of which initiates redefinition of allocated for received incoming requests volumes of system resources. A controlled parameter in the created system is the acceptance or rejection of new incoming requests by its front-end interface. In this case, two scenarios are investigated, which differ in that synchronously or asynchronously received to the front-end interface service signals, the receipt of which marks a complete or partial redefinition of system resources involved in supporting active personalized sessions of infocommunication interaction. The proposed mathematical models for the development of such functional scenarios allow to calculate the probability of rejection of a new input request and the percentage of occupied system resources in terms of synchronous or asynchronous change of the spatial location of terminal devices relative to the base station.*

*The study of the proposed mathematical apparatus showed that the value of indicators from a certain metric in the situation of the second scenario, which characterizes the synchronous movement of IoT end devices relative to the base station, does not depend on the intensity of the input stream of service signals. The study of the influence of the type of distribution law of the stochastic characteristic parameter of a new input request on the values of indicators from a certain metric revealed an objective need to establish regulations on the value of the desired amount of system resources in new input requests.*

**Keywords:** mathematical model, parametric space of accessibility indicators, Markov queuing system, centralized network cluster, infocommunication interaction session.

**Danylchuk Oksana M.** — Cand. Sc. (Pedagog.), 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: yunestiuk@gmail.com ;

**Prysiashniuk Vasyl V.** — Senior Lecturer of the Chair of Metrology and Industrial Automation, e-mail: pvv\_vin@ukr.net

О. Н. Данильчук<sup>1</sup>  
 В. В. Ковтун<sup>2</sup>  
 Е. Д. Никитенко<sup>2</sup>  
 Ю. Ю. Нестюк<sup>2</sup>  
 В. В. Присяжнюк<sup>2</sup>

## Моделирование сценариев развития инфокоммуникационного процесса в беспроводном централизованном сетевом кластере

<sup>1</sup>Донецкий национальный университет имени Василя Стуса;

<sup>2</sup>Винницкий национальный технический университет

*Представлены математические модели развития инфокоммуникационного процесса, который происходит в беспроводном централизованном сетевом кластере. В исследуемом процессе принимает участие множество конечных мобильных устройств, являющихся субъектами информационного взаимодействия с базовой станцией. Последняя обслуживает информационные потребности субъектов в выделенных процессах в собственной информационной среде. Такой бекграунд разрешает рассматривать исследуемый процесс как марковскую систему массового обслуживания с потоком новых входных запросов с потребностями относительно желаемых объемов системных ресурсов и потоком сервисных сигналов, поступление которых инициирует переопределение выделенных для принятых входных запросов объемов системных ресурсов. Управляемым параметром в созданной системе является принятие или отклонение новых входных запросов её front-end интерфейсом. При этом исследуются два сценария, отличающиеся учетом того как синхронно или асинхронно поступают в front-end интерфейс сервисные сигналы, получение которых знаменует полное или частичное переопределение объемов системных ресурсов, задействованных для поддержки активных персонализированных сеансов инфокоммуникационного взаимодействия. Предложенные математические модели развития таких функциональных сценариев разрешают рассчитать вероятность отклонения нового входного запроса и процент занятых системных ресурсов в условиях синхронного или асинхронного изменения пространственного расположения конечных устройств относительно базовой станции.*

*Исследование предложенного математического аппарата показало, что значение показателей по определенной метрике в ситуации реализации второго сценария, характеризующего синхронное перемещение конечных устройств IoT по отношению к базовой станции, не зависит от интенсивности входящего потока сервисных сигналов. Исследование влияния вида закона распределения стохастического характеристического параметра поступления нового входящего запроса на значение показателей из определенной метрики выявило объективную необходимость в установлении регламента по значению желаемого объема системных ресурсов в новых входящих запросах.*

**Ключевые слова:** математическая модель, параметрическое пространство показателей доступности, марковская система массового обслуживания, централизованный сетевой кластер, сеанс инфокоммуникационного взаимодействия.

**Данильчук Оксана Николаевна** — канд. пед. наук, доцент, доцент кафедры прикладной математики, e-mail: oksanadommod@ukr.net ;

**Ковтун Вячеслав Васильевич** — д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры компьютерных систем управления, e-mail: kovtun\_v\_v@vntu.edu.ua ;

**Никитенко Елена Дмитриевна** — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры компьютерных систем управления, e-mail: lena260784@gmail.com ;

**Нестюк Юлия Юриевна** — студент факультета интеллектуальных информационных технологий и автоматизации, e-mail: yunestiuk@gmail.com ;

**Присяжнюк Василий Васильевич** — старший преподаватель кафедры метрологии и промышленной автоматизации, e-mail:pvv\_vin@ukr.net