

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

ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРИЧНОГО ПРОСТОРУ ПОКАЗНИКІВ ДЛЯ ОЦІНЮВАННЯ ДОСТУПНОСТІ ІНФОКОМУНІКАЦІЙНОГО ПРОЦЕСУ В БЕЗДРОТОВОМУ ЦЕНТРАЛІЗОВАНОМУ МЕРЕЖЕВОМУ КЛАСТЕРІ

¹Донецький національний університет імені Василя Стуса, Вінниця;

²Вінницький національний технічний університет

Аналітично визначена модель параметричного простору показників для оцінювання доступності інфокомунікаційного процесу в бездротовому централізованому мережевому кластері. Досліджений процес описується як марковська система масового обслуговування, контрольованим параметром в якій є сумарний обсяг зайнятих системних ресурсів для всіх активних сеансів інфокомунікаційної взаємодії. До складу визначеного простору якісних стохастичних характеристик увійшли: середній обсяг зайнятих системних ресурсів та середня кількість активних сеансів інфокомунікаційної взаємодії в інформаційному середовищі базової станції; імовірність втрати вхідного запиту з причини недостатнього обсягу вільних системних ресурсів або відсутності вільних комунікаційних каналів на стороні базової станції. Також аналітично визначені функціональні залежності значень перелічених якісних характеристик від виду і параметрів функції розподілу обсягу вивільнюваних системних ресурсів базової станції. Як додаткові керовані параметри в створеній моделі враховуються такі характеристики як рівень завантаженості front-end інтерфейсу базової станції і зазначений у вхідному запиті бажаний обсяг системних ресурсів.

З результатів емпіричного дослідження створеного математичного апарату виявилось, що зі зростанням навантаження на front-end інтерфейс досліджуваної системи значення всіх характеристичних параметрів метрики якісних показників зростають. Зазначено, що синхронне зростання значень показника середнього обсягу зайнятих системних ресурсів і показника середньої кількості активних сеансів інфокомунікаційної взаємодії відбувається майже лінійно, на відміну від поведінки значення показника імовірності втрати вхідного запиту, яке зростає експоненційно. Очевидною причиною зростання показника імовірності втрати вхідного запиту є зростання дисперсії значення такого характеристичного параметра, як бажаний обсяг системних ресурсів у вхідних запитах. Також з'ясувалося, що основана на базі геометричного розподілу схема управління розподілом системних ресурсів, задовольняє вхідні запити з меншим значенням бажаного обсягу системних ресурсів та загалом орієнтована на підтримку вже активних сеансів інфокомунікаційної взаємодії.

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

Вступ

Сфера використання пристроїв з бездротовим інтерфейсом взаємокомунікації зростає експоненційно. Очікується, що кількість підключень, здійснюваних М2М пристроями, перевищить пригломшливу цифру $30 \cdot 10^9$. Водночас, зростають і обсяги інформаційних повідомлень, які поширю-

ються таким каналом зв'язку. Наприклад, перехід від телекомунікаційної технології 1080p до 4K призвів до зростання розміру мультимедіа файлів в понад 4 рази за однакової їх тривалості. Водночас апаратна складова комунікаційного обладнання провайдерів комунікаційних послуг оновлюється набагато повільніше. За таких умов єдиний раціональний спосіб запобігання інформаційному колапсу полягає в розвитку програмної складової, яка керує таким обладнанням. Підтвердженням цього тезису є швидкість появи і впровадження нових поколінь мобільної телефонії. Особливо актуальним в контексті комунікації пристроїв Інтернету речей (IoT) є поява в розробленому консорціумом 3GPP стандарті LTE-A Pro профільної технології LTE IoT. Вже відомо, що ця технологія включена і у стандарті покоління 5G. Ця технологія орієнтована на високошвидкісний обмін даними і дозволяє на основі принципів мультидіапазонності керувати процедурою виділення частотних піддіапазонів для нових сеансів взаємокомунікації, зважаючи на тип останніх.

Кожний IoT-пристрій в мережі LTE IoT може передавати дані до гейтів з певною швидкістю. Миттєва швидкість для i -го сеансу в такому разі визначається політикою розподілу ресурсів і обмежена зверху значенням $c_i^{\max} = w \log_2(1 + \gamma_i p_{\max})$, де w — ширина всього доступного частотного діапазону, p_{\max} — пікова потужність передавання корисного сигналу, γ_i — залежне від відстані між i -м суб'єктом-пристроєм і гейтом значення відношення сигнал-шум. Сеанс інфокомунікаційної взаємодії активується лише коли системних ресурсів достатньо, тобто має виконуватися нерівність

$$\frac{c_i}{c_i^{\max}} \leq 1, \text{ де } c_i \text{ запитувана у вхідному запиті } i\text{-м суб'єктом-пристроєм швидкість передавання даних.}$$

Отже, метою дослідження є аналітична формалізація процесу функціонування бездротового централізованого мережевого кластера при контакті множини суб'єктів-ініціаторів і front-end інтерфейсу у вигляді множини підтримуваних системою сеансів інфокомунікаційної взаємодії. При цьому в створюваній математичній моделі множина сеансів інфокомунікаційної взаємодії враховується спрощено, у вигляді інтегральної характеристики — сумарного обсягу зайнятих активними сеансами системних ресурсів.

Об'єктом дослідження є процес перебігу сеансу інфокомунікаційної взаємодії в умовах активного бездротового централізованого мережевого кластера. Предметом дослідження є технології 5G-IoT як базис для визначення параметричного простору, математичний апарат ланцюгів Маркова і систем масового обслуговування для формалізації математичної моделі досліджуваного процесу та методи імітаційного моделювання і математичної статистики для встановлення адекватності отриманих теоретичних результатів.

Огляд аналогів

Процес впровадження технологій покоління 5G для обслуговування численних ресурсоемних IoT-застосувань викриває зростаючу розбіжність між споживчими та індустріальними функціональними сценаріями. Споживчий сегмент IoT створений і розвивається для поліпшення якості життя людей і суспільства в цілому (наприклад, в області автоматизації домашнього господарства [1]—



Рис. 1. Приклади 5G-застосувань індустріального IoT

[3]). Водночас, відносно новий індустріальний сегмент IoT позиціонується як напрям, орієнтований на вдосконалення бізнес-зв'язків між підприємствами [4]—[8]. З переходом до технології 5G промислові користувачі жадають надійної і всерозповсюдженої інформаційної взаємодії більшою мірою, ніж це дозволяли технології поколінь 3G і 4G. Приклади реальних промислових задач такого класу показані на рис. 1. Зокрема, це системи контролю промислового виробництва, системи забезпечення безпеки дорожнього транспорту, системи людино-машинної взаємодії, системи управління в сфері матеріально-технічного постачання і відстеження

переміщення об'єктів тощо [9]—[11].

Вже сформульовані основні принципи, яких необхідно дотримуватись розробникам додатків індустріального IoT [9], [12]. Це сумісність, віртуалізація, децентралізація, модульність, взаємодія в реальному часі, орієнтація на підвищення якості сервісів тощо. До прикладу, в Євросоюзі активно розгортається багаторічна програма, названа «Industrie 4.0» [13], [14]. Її призначення полягає в автоматизації виробничих процесів виготовлення продукції, контролю її якості та здійснення вантажно-розвантажувальних робіт тощо.

З прискоренням темпів досліджень в галузі застосувань індустріального IoT стає зрозуміло, що технології покоління 5G стануть центральною ланкою для забезпечення потреб Industrie 4.0 і схожих програм [15]. В цьому контексті під час створення перспективних систем автоматизації виробництв і служб їх дистанційного контролю першочерговим є розв'язання задачі забезпечення доступності мережевих з'єднань, зокрема і у віддалених і важкодоступних місцях [16]. При цьому для організації сервісів віртуальної або доповненої реальності в задачах тактильного керування передбачається широке застосування сучасних мобільних хмарних технологій [17]. Таким чином, для розв'язання актуальних задач індустріального IoT вже недостатньо традиційних методів теорії інформації. Все актуальнішим стає дослідження гарантоздатності інформаційних процесів в таких системах [18]—[23]. Загострює проблему те, що інфраструктура сучасної мережі Інтернет історично реалізує принцип організації зв'язку «на скільки можливо», тому для забезпечення роботи надійних сервісів індустріального IoT необхідні значні її зміни [24]. Крім вкрай надійних бездротових з'єднань, деякі з застосувань індустріального IoT, наприклад, служби безперервного контролю, до того ж потребують надзвичайно низьких затримок доставки інформації [18]. Як наслідок, весь стек протоколів системи індустріального IoT має відповідати жорстким вимогам щодо гарантоздатності бездротової комунікації [18], [21], [22].

Враховуючи, що функціонал стільникових систем строго регламентований і передбачає необхідність першочергового управління інтерференцією, операторські мережі мобільного зв'язку стають найочевиднішим базисом для реалізації і управління комунікаційної складової індустріального IoT [19], [23], [25]. Втім, обов'язковою умовою є поглиблення інтеграції спеціалізованих технологій із традиційною зараз 3GPP LTE. Відповідно, в рамках екосистеми покоління 5G активно здійснюється інтеграція стільникових систем LTE Advanced з вже наявними (наприклад, Wi-Fi) і новими (наприклад, New Radio) радіотехнологіями для досягнення швидкіснішої, надійнішої і широко поширеної інформаційної взаємодії.

В контексті технічних вимог IoT пристрої можна умовно розділити на відносно просте обладнання для масових застосувань та істотно складніші рішення, орієнтовані на критичне застосування [18]—[23]. Втім, спільним для обох цих класів IoT застосувань є потреба в наявності опорних технологій, створених з орієнтацією на бездротову інформаційну взаємодію стаціонарних і мобільних M2M-пристроїв та інших суб'єктів на великих площах. Дослідники зазначають, що особливо важливою і непростою в критичних застосуваннях є задача організації безперервного зв'язку з рухомими суб'єктами в умовах непласкої поверхні їх переміщення. Незважаючи на те, що різноманітні моделі мобільності розглянуті в контексті обслуговування суб'єктів-користувачів в спеціалізованих («ad-hoc») мережах [26] і стільникових системах зв'язку [27], вплив явища мобільності кінцевих M2M пристроїв в динамічному оточенні на характеристики перспективних технологій покоління 5G вивчені недостатньо [28]—[31]. Відомо, що для застосувань з нестрогими експлуатаційними вимогами щодо передачі інформації, задача поліпшення якості інформаційного обміну може розв'язуватися оперативною зміною топології системи приймачів. На цьому факті заснована сукупність багатокористувацьких технологій взаємопідтримки, наприклад, технологія кооперації абонентів [32], [33]. Однак, ця та аналогічні технології виявилися незастосовними в мережах покоління 5G з причини суворіших обмежень щодо затримки передачі інформації. У таких мережах керувати доступом до радіоресурсу всієї системи має деякий центральний вузол-гейт або front-end інтерфейс [28], [29], [31]. З іншого боку, розвинені технології управління доступом рівня покоління 5G (в разі адекватного їх застосування) сприяють поліпшенню якості бездротового покриття, зниженню інтерференції та пришвидшенню передачі даних. Іншим важливим напрямком досліджень є моделювання узгодженої експлуатації кількох технологій радіодоступу в рамках гетерогенної мережі зв'язку покоління 5G для підвищення надійності бездротового з'єднання, зниження імовірності його передчасної термінації та ефективнішого використання частотного ресурсу [34].

В результаті потреба в належному моделюванні розвитку перспективних сценаріїв надійного функціонування IoT екосистеми на технологічному базисі покоління 5G є вельми висока [28], [30],

[32], [33]. Зокрема, спостерігається дефіцит результатів моделювання перебігу типових сценаріїв 5G-IoT в умовах застосування в системі кількох радіотехнологій, які можуть використовувати альтернативно або одночасно.

Моделі і методи

1. Постановка задачі дослідження

В загальному вигляді front-end інтерфейс типової сучасної системи IoT можна охарактеризувати як багатолінійну систему без черги. Якщо на вхід інтерфейсу надходить вхідний запит від суб'єкта і система приймає рішення його задовольнити, то активується сценарій сеансу інфокомунікаційної взаємодії, на підтримку якого виділяється певний обсяг системних ресурсів. Ці ресурси резервуються на весь час перебігу сеансу. Зауважимо, що суб'єктом-ініціатором сеансу в екосистемі IoT може бути як персона, так і псевдоінтелектуальний пристрій. По завершенню сеансу інфокомунікаційної взаємодії, зарезервовані за ним обсяг системних ресурсів звільнюється. Якщо вхідний запит не задовольняється IoT системою, то він втрачається. Вважатимемо, що причиною втрати запиту є відсутність необхідної кількості вільних системних ресурсів на момент його надходження на вхід front-end інтерфейсу. Наочно щойно описаний процес функціонування досліджуваного бездротового централізованого мережевого кластера показано на рис. 2.

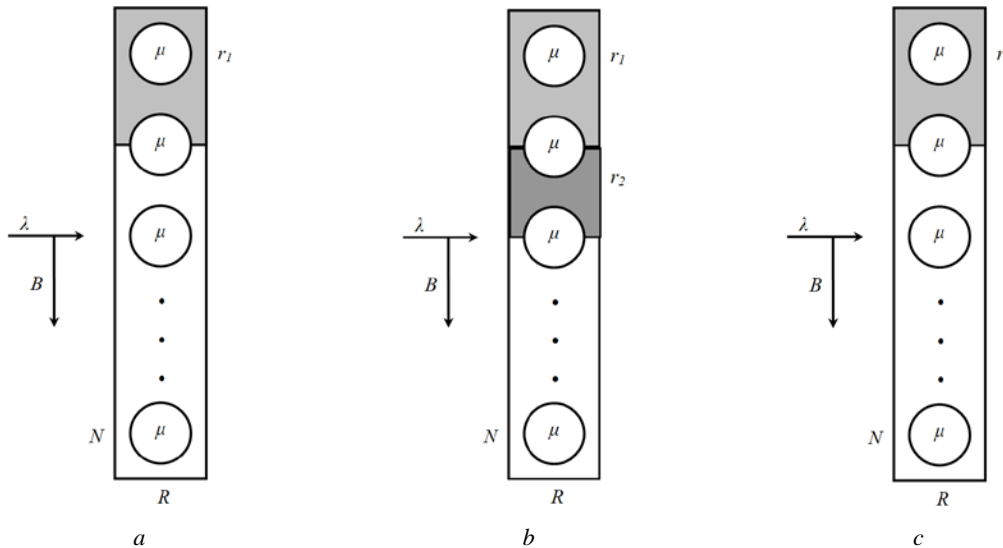


Рис. 2. Базова модель функціонування front-end інтерфейсу екосистеми IoT: *a* — активний один сеанс інфокомунікаційної взаємодії (зайнято: 1 комунікаційний канал; r_1 системних ресурсів); *b* — активні два сеанси інфокомунікаційної взаємодії (зайнято: 2 комунікаційних канали; $r_1 + r_2$ системних ресурсів); *c* — другий сеанс інфокомунікаційної взаємодії термінований (зайнято: 1 комунікаційний канал; r_1 системних ресурсів)

Припустимо, що стохастичні величини, які репрезентують бажані обсяги відповідних типів ресурсів для вхідних запитів, об'єднано у відповідні випадкові вектори. Процеси надходження вхідних запитів та ініціації сеансів інфокомунікаційної взаємодії не впливають на значення елементів вищезгаданих випадкових величин. Також зазначимо, що випадкові вектори є сукупно незалежними та описуються однаковим законом розподілу.

Для забезпечення можливості аналізу процесу функціонування такої екосистеми IoT передбачимо, що кожний сеанс інфокомунікаційної взаємодії характеризується персональним вектором, елементи якого визначають обсяги зарезервованих типів ресурсів. Допустимим є спрощення опису процесу функціонування екосистеми IoT, за якого контрольованим у часі параметром оберемо сумарний обсяг системних ресурсів, зарезервованих за всіма активними сеансами інфокомунікаційної взаємодії (сумарний обсяг зайнятих системних ресурсів).

За такого спрощення необхідно враховувати, що під час перебігу сеансу інфокомунікаційної взаємодії обсяг зарезервованих за ним системних ресурсів може змінюватися. Отже, обсяги системних ресурсів, зарезервованих за сеансом інфокомунікаційної взаємодії в момент його ініціації та момент його термінації можуть відрізнитися. Зважаючи на цей факт стверджуватимемо, що за заданого сумарного обсягу зарезервованих системних ресурсів за всіма активними сеансами інфокомунікаційної взаємодії, обсяг системних ресурсів, який вивільняється в момент термінації сеансу

су, не залежить від поведінки системи IoT до цього моменту і характеризується функцією розподілу, обчислюваною за формулою Байєса [35].

Якщо стохастичний параметр імовірності надходження вхідного запиту до front-end інтерфейсу системи IoT описується розподілом Пуасона, а стохастичний параметр, який характеризує імовірність прийняття вхідного запиту на обслуговування, описується експоненціальним розподілом, то розподіли стаціонарних імовірностей для середнього значення сумарного обсягу зарезервованих системних ресурсів і фактичного значення зарезервованих системних ресурсів збігаються.

З урахуванням вищесформульованого спрощення, розглядатимемо front-end інтерфейс системи IoT при опрацюванні вхідних запитів як систему масового обслуговування з N доступними зовні комунікаційними каналами і наявним дискретним обсягом системних ресурсів R . Процес надходження вхідних запитів на front-end інтерфейс системи IoT характеризується розподілом Пуасона з інтенсивністю λ . Тривалості ініційованих системою IoT для обслуговування прийнятих вхідних запитів сеансів інфокомунікаційної взаємодії характеризуються експоненціальним розподілом з параметром μ . Процес надходження на front-end інтерфейс вхідних запитів і активні сеанси інфокомунікаційної взаємодії є взаємозалежні. В дискретний момент часу t система IoT підтримує $\xi(t)$ активних сеансів суб'єкт-системної інформаційної взаємодії, залучаючи для цього обсяг системних ресурсів, який дорівнює $\delta(t) < R$. Для прийнятого на обслуговування вхідного запиту i система IoT ініціює виділений сеанс інфокомунікаційної взаємодії, для підтримки якого початково резервується обсяг системних ресурсів, який дорівнює $r_i > 0$ дискретних одиниць. Стохастичні величини r_i взаємозалежні і характеризуються єдиною функцією розподілу $F(x)$ з математичним сподіванням m і дисперсією σ^2 . Значення r_i не залежить від процесу надходження на front-end інтерфейс вхідних запитів і вже активних сеансів інфокомунікаційної взаємодії. Наочно процес функціонування спрощеної порівняно з наведеною на рис. 2 системи масового обслуговування, утвореної з урахуванням щойно описаних параметрів, показано на рис. 3.

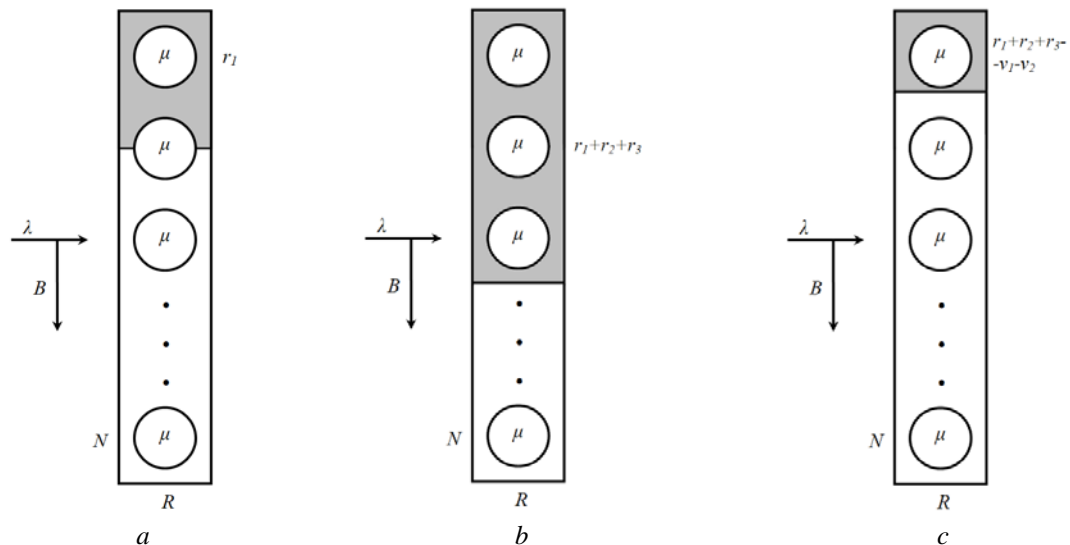


Рис. 3. Спрощена модель функціонування front-end інтерфейсу ексистеми IoT: a — активний один сеанс інфокомунікаційної взаємодії (зайнято: 1 комунікаційний канал; r_1 системних ресурсів); b — активні три сеанси інфокомунікаційної взаємодії (зайнято: 3 комунікаційних канали; $r_1 + r_2 + r_3$ системних ресурсів); c — два сеанси інфокомунікаційної взаємодії терміновані (зайнято: 1 комунікаційний канал; $r_1 + r_2 + r_3 - v_1 - v_2$ системних ресурсів)

Задачами дослідження є:

– формалізація математичної моделі функціонування бездротового централізованого мережевого кластера як результату дослідження сеансів інфокомунікаційної взаємодії $\xi(t)$ та сумарного обсягу залучених для їх підтримки системних ресурсів $\delta(t)$ в динаміці;

– визначення на основі створеної моделі метрики якісних показників для комплексного оцінювання процесу функціонування бездротового централізованого мережевого кластера;

– проведення експериментів з метою апробації створеної математичної моделі і функціональності запропонованої метрики якісних показників.

2. Математична модель функціонування бездротового централізованого мережевого кластера зі спрощеним врахуванням сеансів інфокомунікаційної взаємодії

Вхідний запит втрачається, якщо на момент його надходження на front-end інтерфейс:

– в системі IoT відсутній достатній обсяг вільних системних ресурсів: $R - \delta(t) < r_i$;

– всі комутаційні канали вже задіяні: $\xi(t) = N$. В момент t ініціації сеансу інфокомунікаційної взаємодії для i -го прийнятого вхідного запиту обсяг задіяних системних ресурсів $\delta(t)$ збільшується на стохастичну величину r_i .

В момент τ_i термінації ініційованого для i -го прийнятого вхідного запиту сеансу інфокомунікаційної взаємодії обсяг задіяних системних ресурсів $\delta(\tau_i)$ зменшується на стохастичну величину v_i . Якщо система IoT підтримує $\xi(\tau_i) = k$ активних сеансів інфокомунікаційної взаємодії, витрачаючи для цього обсяг системних ресурсів рівний $\delta(\tau_i) = y$, то значення стохастичної величини v_i не залежить від попереднього стану інформаційного середовища системи IoT і характеризується функцією розподілу Байєса: $f_k(x|y) = P(v_i \leq x | \xi(\tau_i) = k; \delta(\tau_i) = y)$, $0 \leq x \leq y$.

Стохастичні величини r_i набувають значення $j = \overline{0, R}$. Відповідно, визначимо розподіл значення стохастичної величини r_i як $p_j = P(r_i = j)$, $j = \overline{0, R}$. Позначимо як $p_j^{(k)}$, $j = \overline{0, R}$, k -кратну згортку цього розподілу, яка визначає значення, якого набуває стохастична величина $y = \sum_{k=0}^k r_i$.

Відповідно, для кусково-постійної на всій області її визначення функції розподілу $F_k(x|j)$ сумарного обсягу системних ресурсів, зарезервованих за k активними сеансами інфокомунікаційної взаємодії, в точці $x = i$, $i = \overline{0, R}$, спостерігається сплеск до значення $p_{ij}^k = \frac{p_i p_{j-i}^{(k-1)}}{p_j^{(k)}}$, $0 < i < j$. На осно-

ві відомого розподілу p_i , $0 \leq i \leq R$, згортки ймовірностей $p_j^{(k)}$, $k \geq 2$, в загальному вигляді можна визначити за рекурентної формулою

$$p_j^{(k)} = \sum_{i=0}^j p_i p_{j-i}^{(k-1)}. \tag{1}$$

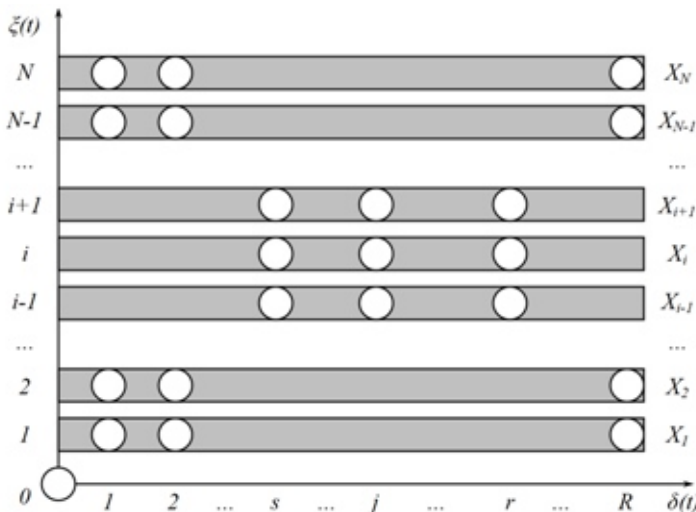


Рис. 4. Візуалізація простру станів стохастичного процесу $X(t)$

Отже, стохастичний процес функціонування досліджуваної IoT системи $X(t) = \{\xi(t), \delta(t)\}$ на множині станів $X_k = \{(k, j) | 0 \leq i \leq R, p_i^{(k)} > 0\}$ можна описати дискретним ланцюгом Маркова, який визначено на просторі станів $X_k = \{(k, i), p_i^{(k)} > 0\}$, $0 \leq i \leq R$.

Наочно такий ланцюг подано на рис. 4, а на рис. 5 показана UML-діаграма станів, коректна за умови, що $1 \leq i \leq N$, $0 \leq s \leq j \leq q \leq R$.

Аналітичним втіленням представленої на рис. 5 UML-діаграми станів є матриця інтенсивностей переходів

$A = [\alpha((i, j), (k, r))]$. Тридіагональна матриця A утворена композицією наддіагональних блоків $\Lambda_1, \dots, \Lambda_N$, діагональних блоків Ψ_0, \dots, Ψ_N і піддіагональних блоків M_1, \dots, M_{N-1} . Відповідно:

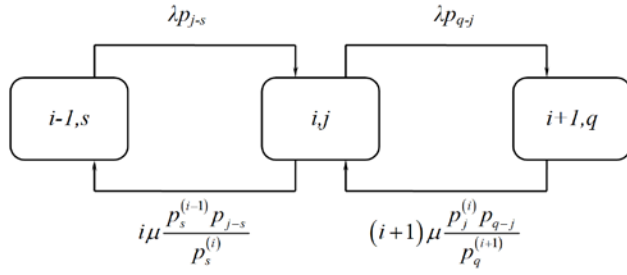


Рис. 5. UML-діаграма станів стохастичного процесу $X(t)$

$$\Psi_0 = -\lambda P_R; \quad (2)$$

$$\Lambda_1 = (\lambda_{0,j})_{(j|(1,j) \in X_1)} = \lambda p_j; \quad (3)$$

$$M_0 = (\mu_{i,0})_{(i|(1,i) \in X_1)} = \mu; \quad (4)$$

$$\Psi_n = (\Psi_{i,j})_{(i,j|(n,i),(n,j) \in X_k)} = \begin{cases} -(\lambda P_{R-i} + n\mu) \forall i = j, \\ 0 \forall i \neq j, \end{cases} \quad (5)$$

$$\forall n = \overline{1, N-1};$$

$$\Psi_N = (\Psi_{i,j})_{(i,j|(N,i),(N,j) \in X_N)} = \begin{cases} -N\mu \forall i = j, \\ 0 \forall i \neq j; \end{cases} \quad (6)$$

$$\Lambda_n = (\lambda_{i,j})_{(i,j|(n,i) \in X_{k-1}, (n,j) \in X_k)} = \begin{cases} -\lambda p_{j-i} \forall i \leq j \leq R, \\ 0; \end{cases} \quad (7)$$

$$M_n = (\mu_{i,j})_{(i,j|(n,i) \in X_{k+1}, (n,j) \in X_k)} = \begin{cases} (n+1)\mu \frac{p_j^{(n)} p_{i-j}}{p_i^{(n+1)}} \forall j \leq i \leq R, \\ 0, \end{cases} \quad \forall n = \overline{1, N}. \quad (8)$$

З виразів (2)—(8) сформулюємо для матриці A систему рівнянь рівноваги вигляду

$$\begin{cases} \lambda P_R q_{0,0} - \mu \sum_{j=0}^R q_{1,j} = 0, \\ (\lambda P_{R-j} + i\mu) q_{i,j} - \lambda \sum_{s=0}^j p_{j-s} q_{i-1,s} - (i+1)\mu \sum_{s=j}^R \frac{p_j^{(i)} p_{s-j}}{p_s^{(i+1)}} q_{i+1,s} = 0 \forall 0 \leq j \leq R, 1 \leq i \leq N-1, \\ N\mu q_{N,j} - \lambda \sum_{s=0}^j p_{j-s} q_{N-1,s} = 0 \forall 0 \leq j \leq R. \end{cases} \quad (9)$$

Розв'язком системи (9) є стаціонарний розподіл процесу $X(t) = \{\xi(t), \delta(t)\}$, де $q_{0,0} = \lim_{t \rightarrow \infty} P\{\xi(t) = 0, \delta(t) = 0\}$, $q_{k,i} = \lim_{t \rightarrow \infty} P\{\xi(t) = k, \delta(t) = i\}$. Виділимо підвектори стаціонарних імовірностей $q_0 = q_{0,0}$, $q_i = (q_{i,j})_{j=0, \overline{R}}$, $i = \overline{1, N}$ і, з урахуванням тридіагональної блочної організації матриці інтенсивностей переходів A , представимо систему (9) в матричній формі:

$$\begin{cases} q_0 \Psi_0 - q_1^T M_0 = 0, \\ q_i^T \Psi_i - q_{i+1}^T M_i - q_{i-1}^T \Lambda_i = 0 \forall i = \overline{1, N-1}, \\ q_N^T \Psi_N - q_{N-1}^T \Lambda_N = 0. \end{cases} \quad (10)$$

Тридіапазонну матрицю A за структурною організацією можна класифікувати як нерозкладну і консервативну. Відповідно, для розв'язання системи рівнянь рівноваги (9) або (10) доцільно використати метод LU -розкладу [36]

$$b = \sum_{k=0}^N b_k \sum_{i=k}^N q_{k,i}, \quad (11)$$

де b_k — умовний середній обсяг зайнятих системних ресурсів за k активних сеансів інфокомунікаційної взаємодії в інформаційному середовищі IoT системи:

$$b_k = \sum_{i=0}^N i p_i^{(k)} / \sum_{i=0}^N p_i^{(k)}. \quad (12)$$

Враховуючи вираз (12), визначимо імовірність B втрати вхідного запиту з причини недостатньо-

го обсягу вільних системних ресурсів або відсутності вільних комунікаційних каналів за виразом

$$B = 1 - \sum_{k=0}^N \sum_{i=k}^N q_{k,i} \sum_{j=1}^{N-i} p_j. \quad (13)$$

І, враховуючи вирази (12) і (13), визначимо середню кількість \bar{N} активних сеансів інфокомунікаційної взаємодії в інформаційному середовищі IoT системи:

$$\bar{N} = \sum_{i=0}^N i q_i, \quad (14)$$

$$\text{де } q_i = \sum_{j=0}^R q_{i,j}.$$

В загальному вигляді процедура аналітичного розв'язання системи рівнянь рівноваги (2)—(8) достатньо громіздка. Втім, якщо стохастичне значення обсягу системних ресурсів, які резервуються IoT системою для прийнятого вхідного запиту у разі ініціації сеансу інфокомунікаційної взаємодії, описується дискретним розподілом, то для визначення стаціонарних імовірностей $q_{k,-}$, $q_{k,j}$, $0 \leq k \leq N$, $0 \leq j \leq R$, пропонуються такі спрощені вирази:

$$q_{k,-} = \lim_{t \rightarrow \infty} P\{\xi(t) = k\} = p_0 \frac{p^k}{k!} \sum_{i=0}^R p_i^{(k)}; \quad (15)$$

$$q_{k,j} = \lim_{t \rightarrow \infty} P\{\xi(t) = k; \delta(t) = j\} = p_0 \frac{p^k}{k!} p_i^{(k)}, \quad (16)$$

$$\text{де } p_0 = 1 / \left(1 + \sum_{k=1}^N \frac{p^k}{k!} \sum_{i=0}^R p_i^{(k)} \right).$$

Підставимо вирази (12) і (15) у вираз (11) і отримаємо орієнтований на прикладне застосування вираз для розрахунку середнього обсягу зайнятих системних ресурсів b

$$b = \sum_{k=0}^N b_k q_{k,-} = p_0 \sum_{k=0}^N \frac{p^k}{k!} \sum_{i=0}^R p_i^{(k)}. \quad (17)$$

Аналогічно доопрацюємо вираз (13) для розрахунку імовірності втрати вхідного запиту з причини недостатнього обсягу вільних системних ресурсів або відсутності вільних комунікаційних каналів

$$B = 1 - \sum_{k=0}^{N-1} \sum_{i=0}^R q_{k,i} \sum_{j=0}^{R-i} p_j = 1 - p_0 \sum_{k=0}^{N-1} \frac{p^k}{k!} \sum_{i=0}^R p_i^{(k+1)}. \quad (18)$$

3. Практично орієнтована метрика якісних показників для комплексного оцінювання процесу функціонування бездротового централізованого мережевого кластера

Дослідимо процес опрацювання прийнятого вхідного запиту системою IoT враховуючи, що стохастичне значення обсягу системних ресурсів, які резервуються при ініціації сеансу інфокомунікаційної взаємодії, описується такими імовірнісними розподілами як біноміальний, змішаний біноміальний і геометричний. Для сталості умов проведення дослідів вважатимемо, що наявний обсяг системних ресурсів R і кількість комунікаційних каналів N збігаються: $R = N$. Базовим для обчислення імовірнісно-часових характеристик моделі (13)—(18) є розрахунок за виразом (1) згортки розподілу імовірностей $p_j^{(k)}$ для вибраного дискретного розподілу стохастичного значення обсягу системних ресурсів r_j , які резервуються за ініціації сеансу інфокомунікаційної взаємодії для j -го прийнятого вхідного запиту.

Розглянемо окремий випадок, коли стохастична величина $r_j \geq 0$ описується біноміальним розподілом

$$p_i = \binom{r}{i} p^i (1-p)^{r-i}, \quad 0 \leq i \leq r, \quad (19)$$

де $p = \frac{m}{r}$. Адаптуємо вираз (19) для опису стохастичної величини r_j

$$p_j^{(k)} = \binom{kr}{j} p^j (1-p)^{kr-j}. \quad (20)$$

З урахуванням виразу (20) формалізуємо розподіл обсягу системних ресурсів, який звільниться при термінації сеансу інфокомунікаційної взаємодії, який підтримував обслуговування i -го прийнятого вхідного запиту

$$p_{ij}^k = \frac{p_i p_{j-i}^{(k-1)}}{p_j^{(k)}} = \frac{\binom{r}{i} \binom{kr-r}{j-i}}{\binom{kr}{j}}, \quad (21)$$

де $0 \leq i \leq r$, $i \leq j$, $0 \leq j \leq kr$. З виразу (21) випливає, що значення p_{ij}^k залежить тільки від максимального обсягу системних ресурсів r , доступного для обслуговування одного вхідного запиту.

Розглянемо окремий випадок, коли стохастична величина $r_j \geq 0$ описується змішаним біноміальним розподілом

$$p_i = \binom{r-1}{i-1} p^{i-1} (1-p)^{r-i}, \quad 1 \leq i \leq r, \quad (22)$$

де $p = \frac{m-1}{r-1}$. Для функції розподілу (22) маємо $m = np + (1-p)$ і $\sigma^2 = rp(1-p)$. Адаптуємо вираз (22) для опису стохастичної величини r_j

$$p_j^{(k)} = \binom{k(r-1)}{j-k} p^{j-k} (1-p)^{kr-j}. \quad (23)$$

З урахуванням виразу (23) формалізуємо розподіл обсягу системних ресурсів, який звільниться при термінації сеансу інфокомунікаційної взаємодії, який підтримував обслуговування i -го прийнятого вхідного запиту

$$p_{ij}^k = \frac{p_i p_{j-i}^{(k-1)}}{p_j^{(k)}} = \frac{\binom{r-1}{i-1} \binom{k(r-1)-(r-1)}{(j-k)-(i-1)}}{\binom{k(r-1)}{j-k}}, \quad (24)$$

де $1 < i \leq r$, $i \leq j$, $k \leq j \leq k(r-1)$, $1 < k \leq j$.

Розглянемо окремий випадок, при якому стохастична величина $r_j \geq 0$ описується геометричним розподілом

$$p_i = p^i (1-p), \quad 1 \leq i \leq r. \quad (25)$$

Для функції розподілу (25) маємо $m = \frac{1-p}{p}$ і $\sigma^2 = \frac{1-p}{p^2}$. Адаптуємо вираз (25) для опису стохастичної величини r_j

$$p_j^{(k)} = \binom{k+j-1}{k} p^j (1-p)^k. \quad (26)$$

З урахуванням виразу (26) формалізуємо розподіл обсягу системних ресурсів, який звільниться при термінації сеансу інфокомунікаційної взаємодії, який підтримував обслуговування i -го прийнятого вхідного запиту

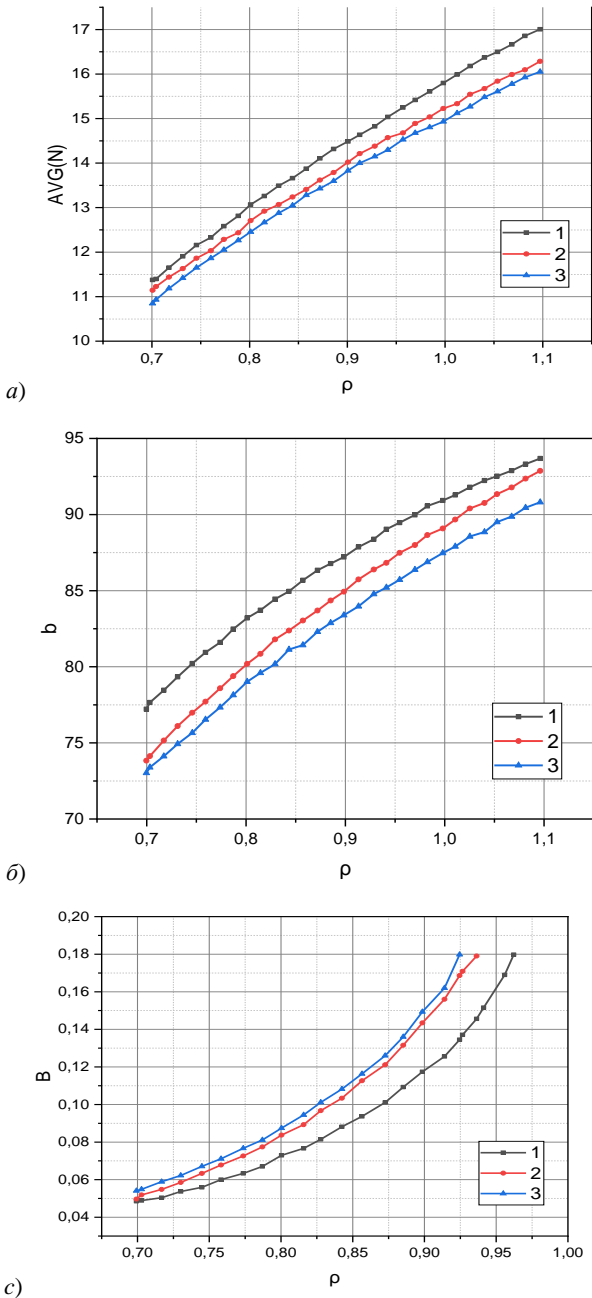


Рис. 6. Візуалізація залежностей: а — $\bar{N} = f(\rho, \{1, 2, 3\})$;
 б — $b = f(\rho, \{1, 2, 3\})$; в — $B = f(\rho, \{1, 2, 3\})$

2 — біноміальним розподілом (вираз (21)); 3 — змішаним біноміальним розподілом (вираз (27)).
 Параметри дискретних імовірнісних розподілів 1—3 підбрані так, щоби математичне сподівання надходження вхідного запиту на front-end інтерфейс досліджуваної системи IoT m і максимальний доступний для прийнятого вхідного запиту обсяг системних ресурсів r були однаковими і дорівнювали 5,4 і 18, відповідно. Умова рівності дисперсій дискретних імовірнісних розподілів 1—3 в цьому дослідженні не виконувалася.

Загалом, з аналізу представлених на рис. 6 експериментальних результатів можна зробити висновки, що вид функції управління розподілом обсягу системних ресурсів суттєво впливає на всі якісні показники функціонування бездротового централізованого мережевого кластера. Водночас, дослідження взаємозалежностей функцій $f(\rho, \{1, 2, 3\})$ в метриці $\{\bar{N}, b, B\}$ не дозволили визначити загальних для всіх якісних показників тенденцій розвитку досліджуваного процесу. Ця обставина змушує додатково дослідити вплив дисперсії σ^2 значення основного характеристичного парамет-

$$p_{ij}^k = \frac{p_i p_{j-i}^{(k-1)}}{p_j^{(k)}} = \frac{\binom{k+j-i-2}{k-1}}{\binom{k+j-1}{k}}, \quad (27)$$

де, $i \leq j, k \leq j, 1 < k \leq j$.

Отже, вирази (21), (24), (27) враховують вид розподілу стохастичного значення обсягу системних ресурсів, зарезервованих за активним сеансом інфокомунікаційної взаємодії. Ці вирази конкретизують значення попередньо визначених виразами (14), (17), (18) складових показників метрики IoT $\{\bar{N}, b, B\}$, орієнтованої на якісну характеристику процесу функціонування бездротового централізованого мережевого кластера.

Постановка і результати експериментів

Проведемо обчислювальний експеримент з моделлю (13)—(18), враховуючи вирази (21), (24), (27) і задавши такі вихідні значення керуваних параметрів: $\mu = 1; \lambda = \{12, 13, \dots, 20\}; R = N = 100$.

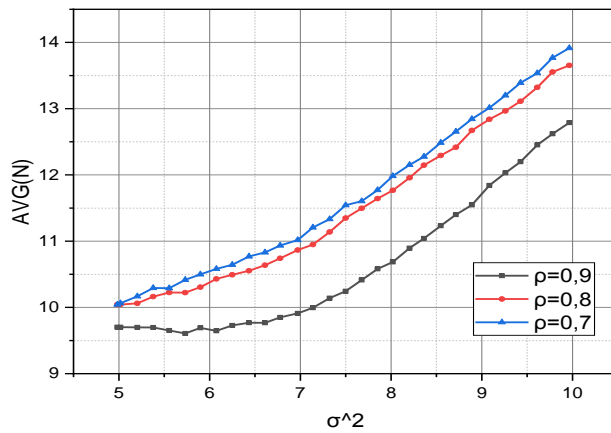
На рис. 6 показані графіки залежності таких імовірнісних характеристик досліджуваної IoT системи як:

- середня кількість активних сеансів інфокомунікаційної взаємодії в інформаційному середовищі IoT системи \bar{N} ;
 - середній обсяг зайнятих системних ресурсів b ;
 - імовірність втрати вхідного запиту з причини недостатнього обсягу вільних системних ресурсів або відсутності вільних комунікаційних каналів B ,
- від завантаженості $\rho = \{0,7; 0,8; \dots; 1,1\}$ з урахуванням того, що розподіл обсягу системних ресурсів p_{ij}^k , який звільниться при термінації сеансу інфокомунікаційної взаємодії, який підтримував обслуговування i -го прийнятого вхідного запиту, описується:

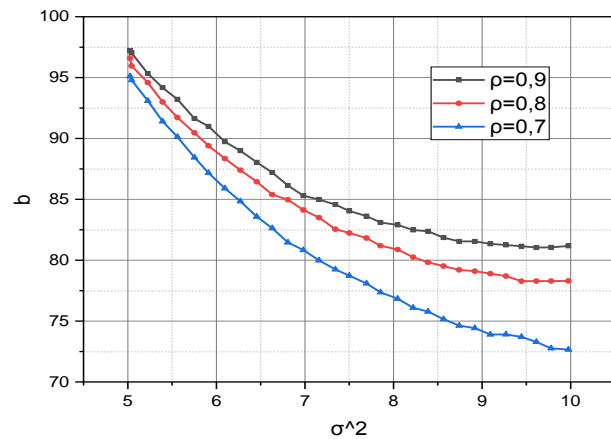
1 — геометричним розподілом (вираз (27));

ру вхідного запиту — бажаного обсягу системних ресурсів r , на значення якісних параметрів метрики $\{\bar{N}, b, B\}$ для досліджуваної IoT системи.

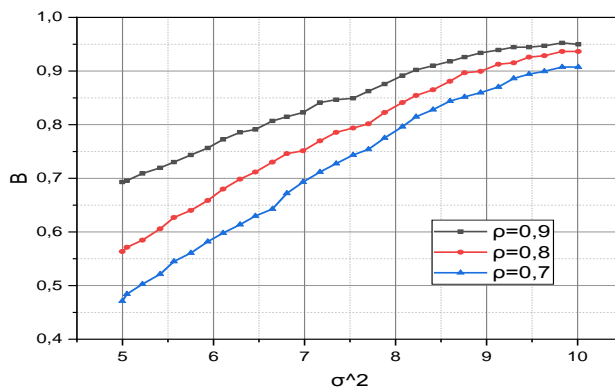
Репрезентований на рис. 6 експеримент показав, що зі зростанням навантаження ρ , значення



a)



b)



c)

Рис. 7. Візуалізація залежностей:

$$a — \bar{N} = f(\sigma^2, \rho = \{0,7; 0,8; 0,9\}); b — b = f(\sigma^2, \rho = \{0,7; 0,8; 0,9\});$$

$$c — B = f(\sigma^2, \rho = \{0,7; 0,8; 0,9\})$$

репрезентуються біноміальними розподілами 2 і 3 (на відміну від схеми, яка репрезентує геометричний розподіл 1), властива менша середня завантаженість системних ресурсів системи IoT.

І, нарешті, з рис. 6с впливає, що зі зростанням значення завантаженості ρ графіки залежностей $B = f(\rho, 2)$ і $B = f(\rho, 3)$, які репрезентують біноміальні функції розподілу обсягу доступних системних ресурсів, зростають суттєво швидше за графік залежності $B = f(\rho, 1)$, який репрезентує геометричну функції розподілу значення стохастичної величини r . Отже, зі зростанням значення завантаженості ρ від функції розподілу, тобто схема керування значенням обсягу доступних сис-

темних параметрів метрики $\{\bar{N}, b, B\}$ найдинамічніше реагували, коли значення характеристичного параметра r для вхідних запитів описувалося геометричним розподілом. Отже, візьмемо цей тип розподілу як базовий і дослідимо залежність параметрів метрики $\{\bar{N}, b, B\}$ від зростання дисперсії σ^2 значення r для вхідних запитів для фіксованих рівнів навантаження $\rho = \{0,7; 0,8; 0,9\}$. Результати такого експерименту у вигляді сукупності графіків

$$\{\bar{N}, b, B\} = f(\sigma^2 = \{5, 6, \dots, 10\}, \rho = \{0,7; 0,8; 0,9\})$$

показані на рис. 7.

Враховуючи подані на рис. 6а результати, можна стверджувати, що зі зростанням завантаженості ρ тяжіння значень функції $\bar{N} = f(\rho, 2)$ до значень функції $\bar{N} = f(\rho, 1)$ поступово змінюється на тяжіння значень функції $\bar{N} = f(\rho, 2)$ до значень функції $\bar{N} = f(\rho, 3)$. Водночас, для всього дослідженого діапазону значень ρ , організація процедури керування розподілом системних ресурсів за схемою, яка репрезентується геометричним розподілом 1 (на відміну від схем, які репрезентують біноміальні розподіли 2 і 3), дозволяє одночасно підтримувати в інформаційному просторі системи IoT більшу середню кількість активних сеансів інфокомунікаційної взаємодії.

З показаних на рис. 6б експериментальних результатів випливає, що зі зростанням завантаженості ρ тяжіння значень функції $b = f(\rho, 2)$ до значень функції $b = f(\rho, 3)$ поступово змінюється на тяжіння значень функції $b = f(\rho, 2)$ до значень функції $b = f(\rho, 1)$. Для всього дослідженого діапазону значень ρ , процедурам керування розподілом системних ресурсів за схемами, які

темних ресурсів для нових вхідних запитів, починає щораз суттєвіше впливати на значення параметра втрати вхідних запитів B .

З поданих на рис. 7а результатів видно, що для всіх рівнів завантаженості інформаційного середовища досліджуваної IoT системи зі зростанням значення дисперсії σ^2 середня кількість активних сеансів інфокомунікаційної взаємодії \bar{N} зростає нелінійно. Втім, вартий уваги факт, що за порядком збільшення швидкості зростання досліджувані функції можна вишикувати так: $\bar{N} = f(\sigma^2, \rho = 0,9)$, $\bar{N} = f(\sigma^2, \rho = 0,8)$, $\bar{N} = f(\sigma^2, \rho = 0,7)$. Тобто зі спаданням завантаженості σ^2 кількість активних сеансів інфокомунікаційної взаємодії \bar{N} зростає. Це свідчить про те, що заснована на геометричному розподілі схема управління розподілом системних ресурсів надає перевагу вхідним запитам з меншою потребою у системних ресурсах.

Висновки

Вперше запропонована математична модель процесу суб'єкт-системної інформаційної взаємодії в IoT екосистемі. В моделі, на відміну від існуючих, досліджений процес описано спрощеною системою масового обслуговування, зведеною до дискретного ланцюга Маркова, в якому контрольованим параметром є сумарний обсяг зайнятих системних ресурсів для всіх активних сеансів суб'єкт системної взаємодії. На основі створеної моделі аналітично описано метрику параметрів, які повно характеризують якість функціонування дослідженої IoT системи. Запропонована метрика включає такі стохастичні характеристичні параметри як: середня кількість активних сеансів інфокомунікаційної взаємодії в інформаційному середовищі IoT системи, середній обсяг зайнятих системних ресурсів, імовірність втрати вхідного запиту з причини недостатнього обсягу вільних системних ресурсів або відсутності вільних комунікаційних каналів. Також аналітично формалізовано залежність згаданих стохастичних характеристичних параметрів від виду і параметрів функції розподілу обсягу вивільнюваних системних ресурсів. В запропонованих виразах також враховується рівень завантаженості front-end інтерфейсу системи IoT і зазначений у вхідному запиті бажаний обсяг системних ресурсів.

Враховуючи наведені на рис. 6 результати, можна стверджувати, що зі зростанням навантаження ρ на front-end інтерфейс досліджуваної системи IoT значення всіх параметрів метрики $\{\bar{N}, b, B\}$ зростають. Відмітимо, що зростання значень показника середньої кількості активних сеансів інфокомунікаційної взаємодії \bar{N} та показника середнього обсягу зайнятих системних ресурсів b відбувається майже лінійно і синхронно, на відміну від зростання значення показника імовірності втрати вхідного запиту B , яке відбувається експоненційно. Також зауважимо, що показники \bar{N} і b характеризують внутрішні процеси в інформаційному середовищі досліджуваної IoT системи, тоді як показник B характеризує її реакцію на зовнішні подразники — нові вхідні запити. В такому разі причиною експоненційного зростання показника B може бути значна дисперсія основного характеристичного параметра вхідних запитів — значення бажаного обсягу системних ресурсів r . Для перевірки цього твердження і проведено серію експериментів, результати яких подані на рис. 7. З показаних на рис. 7b емпіричних результатів випливає, що для всіх рівнів завантаженості інформаційного середовища досліджуваної IoT системи зі зростанням значення дисперсії σ^2 середній обсяг зайнятих системних ресурсів b спадає нелінійно. Цей факт говорить про те, що зі зростанням дисперсії σ^2 досліджувана IoT система надає перевагу підтримці активних сеансів інфокомунікаційної взаємодії перед задоволенням нових вхідних запитів. Цей висновок однозначно підтверджується результатами, показаними на рис. 7c. Видно, що зі зростанням значення дисперсії σ^2 кількість втрачених вхідних запитів B нелінійно зростає для всіх рівнів завантаженості ρ . Резюмуючи зазначимо, що заснована на геометричному розподілі схема управління розподілом системних ресурсів переважно задовольняє вхідні запити з меншим значенням r та, в цілому, орієнтована на підтримку вже активних сеансів інфокомунікаційної взаємодії.

Подальші дослідження планується спрямувати на підвищення обчислювальної ефективності методів розрахунку характеристичних параметрів метрики запропонованої моделі.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] M. H. Miraz, M. Ali, P. S. Excell, and R. Picking, "A review on Internet of Things (IoT), Internet of Everything (IoE) and Internet of Nano Things (IoNT)," in *Internet Technologies and Applications (ITA)*, 2015, pp. 219-224. <https://doi.org/10.1109/ITechA.2015.7317398>.
- [2] K. Kaur, "A Survey on Internet of Things – Architecture, Applications, and Future Trends," in *First International Conference on Secure Cyber Computing and Communication (ICSCCC)*, 2018, pp. 581-583. <https://doi.org/10.1109/ICSCCC.2018.8703341>.
- [3] S. S. Sabry, N. A. Qarabash, and H. S. Obaid, "The Road to the Internet of Things: a Survey," in *Annual Information Technology, Electromechanical Engineering and Microelectronics Conference (IEMECON)*, 2019, pp. 290-296. <https://doi.org/10.1109/IEMECONX.2019.8876989>.
- [4] Y. Chen, and M. Long, "Development of Industrial Chain of Internet of Things Based on 5G Communication Technique," in *International Conference on Machine Learning and Big Data Analytics for IoT Security and Privacy (SPIOT)*, vol 1283, Springer, Cham., 2020. https://doi.org/10.1007/978-3-030-62746-1_100.
- [5] K. Tange, M. De Donno, X. Fafoutis, and N. Dragoni, "A Systematic Survey of Industrial Internet of Things Security: Requirements and Fog Computing Opportunities," in *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 22, no. 4, pp. 2489-2520, 2020. <https://doi.org/10.1109/COMST.2020.3011208>.
- [6] Y. Ren, R. Xie, F. R. Yu, T. Huang, and Y. Liu, "Potential Identity Resolution Systems for the Industrial Internet of Things: A Survey," in *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 23, no. 1, pp. 391-430, Firstquarter 2021. <https://doi.org/10.1109/COMST.2020.3045136>.
- [7] M. Serro, S. Hack, M. Henze, M. Schuba, and K. Wehrle, "Challenges and Opportunities in Securing the Industrial Internet of Things," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 17, no. 5, pp. 2985-2996, May, 2021. <https://doi.org/10.1109/TII.2020.3023507>.
- [8] H. Xu, W. Yu, D. Griffith, and N. Golmie, "A Survey on Industrial Internet of Things: A Cyber-Physical Systems Perspective," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 78238-78259, 2018. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2884906>.
- [9] P. Radanliev, D. De Roure, S. Cannady, R. M. Montalv, R. Nicolescu, and M. Huth, "Economic impact of IoT cyber risk – Analysing past and present to predict the future developments in IoT risk analysis and IoT cyber insurance," in *Living in the Internet of Things: Cybersecurity of the IoT*, 2018, pp. 1-9. <https://doi.org/10.1049/cp.2018.0003>.
- [10] A. Hidayati, M. Reza, N. M. Adriansyah, and M. I. Nashiruddin, "Techno-Economic Analysis of Narrowband IoT (NB-IoT) Deployment for Smart Metering," in *Asia Pacific Conference on Research in Industrial and Systems Engineering (APCoRISE)*, 2019, pp. 1-6. <https://doi.org/10.1109/APCoRISE46197.2019.9318920>.
- [11] G. Bedi, G. K. Venayagamoorthy, R. Singh, R. R. Brooks, and K. Wang, "Review of Internet of Things (IoT) in Electric Power and Energy Systems," *Internet of Things Journal*, vol. 5, no. 2, pp. 847-870, April, 2018. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2018.2802704>.
- [12] T. Heinis, J. Hilario, and M. Meboldt, "Empirical study on innovation motivators and inhibitors of Internet of Things applications for industrial manufacturing enterprises," *J. Innov. Entrep.* vol. 7, 10, 2018. <https://doi.org/10.1186/s13731-018-0090-7>.
- [13] M. Gundall et al. "5G as Enabler for Industrie 4.0 Use Cases: Challenges and Concepts," in *23rd International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*, 2018, pp. 1401-1408. <https://doi.org/10.1109/ETFA.2018.8502649>.
- [14] C. Binder, D. Draxler, C. Neureiter, and G. Lastro, "Using a model-based engineering approach for developing Industrial Internet of Things applications," in *Conference on Industrial Cyberphysical Systems (ICPS)*, 2020. pp. 35-40. <https://doi.org/10.1109/ICPS48405.2020.9274701>.
- [15] A. Giehl, and S. Plaga, "Implementing a performant security control for Industrial Ethernet," in *2018 International Conference on Signal Processing and Information Security (ICSPIS)*, 2018, pp. 1-4. <https://doi.org/10.1109/CSPIS.2018.8642758>.
- [16] S. Wijethilaka, and M. Liyanage, "Realizing Internet of Things with Network Slicing: Opportunities and Challenges," in *18th Annual Consumer Communications & Networking Conference (CCNC)*, 2021, pp. 1-6. <https://doi.org/10.1109/CCNC49032.2021.9369637>.
- [17] S. M. A. Oteafy, and H. S. Hassanein, "Leveraging Tactile Internet Cognizance and Operation via IoT and Edge Technologies," *Proceedings of the IEEE*, vol. 107, no. 2, pp. 364-375, Feb. 2019. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2018.2873577>.
- [18] 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>.
- [19] 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, Oct. 2020. <https://doi.org/10.2174/2210327910999201009163958>.
- [20] 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)*, Deggendorf, Germany, 2020; pp. 140-143. <https://doi.org/10.1109/ACIT49673.2020.9208883>.
- [21] 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>.
- [22] O. V. Bisikalo, V. V. Kovtun, O. V. Kovtun, 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>.

- [23] 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.
- [24] A. A. Patil, and V. S. Badgujar, "A Comprehensive Survey on Theoretic Perspective Providing Future Directions on IoT," in *International Conference on Smart City and Emerging Technology (ICSCET)*, 2018, pp. 1-7. <https://doi.org/10.1109/ICSCET.2018.8537285> .
- [25] M. Al-Ma'aitah, A. Saad, and A. Alwadain, "Modeling of the Schemes for Organizing a Session of Person-System Interactions in the Information System for Critical Use Which Operates in a Wireless Communication Environment," in *Symmetry*, 13, 2021, 391. <https://doi.org/10.3390/sym13030391> .
- [26] J. K. Jain, and D. Chauhan, "Analytical study on Mobile Ad hoc Networks for IPV6," in *4th International Conference on Internet of Things: Smart Innovation and Usages (IoT-SIU)*, 2019, pp. 1-6. <https://doi.org/10.1109/IoT-SIU.2019.8777486> .
- [27] S. Savazzi et al. "A cloud-IoT model for reconfigurable radio sensing: The Radio. Sense platform," in *4th World Forum on Internet of Things (WF-IoT)*, 2018, pp. 179-185. <https://doi.org/10.1109/WF-IoT.2018.8355098> .
- [28] N. Ferry, and P. H. Nguyen, "Towards Model-Based Continuous Deployment of Secure IoT Systems," in *22nd International Conference on Model Driven Engineering Languages and Systems Companion (MODELS-C)*, 2019, pp. 613-618. <https://doi.org/10.1109/MODELS-C.2019.00093> .
- [29] M. T. Rossi, M. De Sanctis, L. Iovino, and A. Rutle, "A Multilevel Modelling Approach for Tourism Flows Detection," in *22nd International Conference on Model Driven Engineering Languages and Systems Companion (MODELS-C)*, 2019, pp. 103-112. <https://doi.org/10.1109/MODELS-C.2019.00020> .
- [30] M. Aazam, and K. A. Harras, "Mapping QoE with Resource Estimation in IoT," in *5th World Forum on Internet of Things (WF-IoT)*, 2019, pp. 464-467. <https://doi.org/10.1109/WF-IoT.2019.8767254> .
- [31] A. Moawad, T. Hartmann, F. Fouquet, G. Nain, J. Klein, and Y. Le Traon, "Beyond discrete modeling: A continuous and efficient model for IoT," in *18th International Conference on Model Driven Engineering Languages and Systems (MODELS)*, 2015, pp. 90-99. <https://doi.org/10.1109/MODELS.2015.7338239> .
- [32] X. Chen, S. Sarkar, and M. H. Lotfi, "The Interplay of Competition and Cooperation Among Service Providers, part I," *IEEE Transactions on Network Science and Engineering*, vol. 7, no. 4, pp. 2799-2814, Oct.-Dec. 2020. <https://doi.org/10.1109/TNSE.2020.2995579> .
- [33] X. Chen, S. Sarkar, and M. H. Lotfi, "The Interplay of Competition and Cooperation Among Service Providers (Part II)," *IEEE Transactions on Network Science and Engineering*, vol. 7, no. 4, pp. 2815-2829, Oct.-Dec. 2020. <https://doi.org/10.1109/TNSE.2020.3001946> .
- [34] A. K. Singh, and P. Kumar, "Advancement in Quality of Services in Wireless Sensor Networks," in *3rd International Conference On Internet of Things: Smart Innovation and Usages (IoT-SIU)*, 2018, pp. 1-5. <https://doi.org/10.1109/IoT-SIU.2018.8519842> .
- [35] Z. Zhang, "A Bayesian Network Incremental Algorithm for Public Safety Data Analysis," in *5th International Conference on Mechanical, Control and Computer Engineering (ICMCCE)*, 2020, pp. 1870-1873. <https://doi.org/10.1109/ICMCCE51767.2020.00410>
- [36] A. Bushnag, "Investigating the Use of Pipelined LU Decomposition to Solve Systems of Linear Equations," in *International Conference on Computing and Information Technology (ICCI-1441)*, 2020, pp. 1-5. <https://doi.org/10.1109/ICCI-144147971.2020.9213785> .

Рекомендована кафедрою автоматизації та інтелектуальних інформаційних технологій ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 23.10.2021

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

Determination of Parametric Space of Indicators for Evaluation of Availability of Infocommunications Process in Wireless Centralized Network Cluster

¹Vasyl' Stus Donetsk National University;

²Vinnitsia National Technical University

The article analytically defines the model of parametric space of indicators for assessing the availability of infocommunication process in a wireless centralized network cluster. The researched process is described as a Markov queuing system, the controlled parameter of which is the total amount of occupied system resources for all active sessions of infocommunication interaction. The defined space of qualitative stochastic characteristics included: the average amount of occupied system resources and the average number of active sessions of infocommunication interaction in the information environment of the base station; the probability of losing the incoming request due to insufficient free system resources or lack of free communication channels on the base station side. Also, the functional dependences of the values of the listed qualitative characteristics on the type and parameters of the volume distribution function of the released system resources of the base station are analytically determined. As additional controlled parameters in the created model such characteristics as the level of loading of the front-end interface of the base station and the desired amount of system resources specified in the input request are taken into account.

From the results of empirical research of the created mathematical apparatus it was found that with increasing load on the front-end interface of the studied system, the values of all characteristic parameters of the metric of qualitative indicators increase. Note that the simultaneous increase in the values of the average volume of occupied system resources and the average number of active sessions of infocommunication interaction occurs almost linearly, in contrast to the behavior of the value of the probability of loss of incoming request, which increases exponentially. The obvious reason for the increase in the probability of losing an incoming request is the increase in the variance of the value of such a characteristic parameter as the desired amount of system resources in incoming requests. It was also found that the geometric distribution-based scheme for managing the allocation of system resources shows a tendency to satisfy incoming requests with less value of the desired amount of system resources and is generally focused on supporting already active sessions of infocommunication interaction.

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

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: yynestiuk@gmail.com ;

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