

О.Й. КАДАЦЬКА, канд. техн. наук, С.О. САБУРОВА

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ЗАТРИМКИ ПЕРЕДАЧІ ДАНИХ В SDN-КЕРОВАНІЙ 5G МЕРЕЖІ

Вступ

Мережі мобільного зв'язку 5G нового покоління повинні забезпечити підтримку різноманітних сервісів, які можна згрупувати [1]:

- 1) покращений мобільний широкосмуговий доступ (enhanced Mobile Broadband, eMBB);
- 2) масове підключення та обмін даних між машинними терміналами (massive Machine Type Communications, mMTC);
- 3) наднадійний зв'язок із низькими затримками (Ultra-Reliable and Low Latency Communications, URLLC).

Для реалізації таких різноманітних сценаріїв доставки послуг 5G мережі повинні відповідати основним вимогам:

- 1) пікова швидкість передачі даних на нізсхідному каналі зв'язку – 20 біт/с та 10 Гбіт/с на висхідному каналі зв'язку;
- 2) пікова спектральна ефективність на нізсхідному каналі зв'язку – 30 біт/с/Гц та 15 біт/с/Гц на висхідному каналі зв'язку;
- 3) мінімальна затримка в підсистемі радіодоступу 0,5 мс для сервісів унаднадійного зв'язку URLLC та 4 мс – високошвидкісного зв'язку eMBB;
- 4) автономна робота машинних терміналів без підзарядки акумулятора протягом щонайменше 10-ти років (і бажано до 15 років);
- 5) максимальна щільність підключених до мережі пристроїв 1000000 пристроїв/км² у міських умовах;
- 6) функції мобільності повинні підтримуватись при максимальній швидкості руху об'єктів 500 км/год.

Програмно визначена мережа SDN (Software-Defined Networking) – підхід, що забезпечує інтелектуальні та гнучкі програмовані 5G мережі, здатні конфігурувати та контролювати додатки/сервіси більш детально та в масштабах усієї мережі. SDN створює віртуалізовану площину управління, яка здатна застосовувати інтелектуальні управлінські рішення в мережних функціях. Це усуває розрив між наданням і управлінням якістю послуг (Quality of Experience, QoE) в 5G мережах [2]. SDN може забезпечувати контекстно-залежне управління QoE та відповідати ключовим показникам продуктивності (Key Performance Indicator, KPI) 5G мережі, зберігаючи її цілісність, надійність, а також зменшуючи затримку для чутливих до затримок мультимедійних програм.

Основні методи конфігурування контролерів SDN Open Flow при взаємодії з центром обробки даних 5G мережі

Операційна система мережі (Network Operating System, NOS) використовується для маршрутизації пакетів та є контролером в парадигмі SDN, центральним компонентом, де реалізується об'єднання роз'єднаних інтелектуальних даних звичайних мережних пристроїв. Існують різні контролери SDN, які побудовані на стеку різних мов програмування.

OpenFlow є основним протоколом архітектури SDN. Контролери використовують протокол OpenFlow для зв'язку з комутаторами (пристроями пересилання). OpenFlow не є специфічним протоколом постачальника, який передбачає, що контролер може спілкуватися з кожним комутатором незалежно від постачальника. Комутатори SDN відрізняються від звичайних комутаторів, тому комутатори SDN – пристрої пересилання, оскільки вони оснащені лише площинами даних. Вони можуть бути апаратними або програмними: OVS (Open

vSwitch) – це більш популярний віртуальний комутатор, який використовується в парадигмі SDN для підключення кінцевих пристроїв.

Інструмент моделювання SDN Mininet – симулятор з відкритим кодом для тестування мережі SDN OpenFlow, що дозволяє всю мережу створити як віртуальну машину, яку можна завантажувати, запускати, перевіряти та змінювати. Віртуальні комутатори в Mininet (Open vSwitch) є різновидом програмних комутаторів OpenFlow.

За допомогою SDN у центрі обробки даних кожна програма може розпізнавати конфігурацію 5G мережі на основі того, як для неї виглядає мережне обладнання, але лише швидкість, доступні місця та ресурси такі, як сховище. Площина управління надсилає сигнали на площину даних для переналаштування комутаторів або іншого обладнання для задоволення (або кращого задоволення) усіх потреб додатків, що логічно, але не фізично змінює конфігурацію мережі так, що нова мережа виглядає як інша фізична мережа для програм, включаючи мережні ресурси. За допомогою такого типу віртуалізації потоки даних програми через мережу прискорюються і вона має доступ до більшої пам'яті.

Математична модель затримки в SDN-орієнтованому управлінні ресурсами 5G-мережі

Модель взаємодії між кожним користувачем і радіодоступом RAP на основі SDN платформи з OpenFlow протоколом для 5G мережі включає елементи:

- мережні контролери;
- сервери радіобазових станцій;
- комутатори (switch OpenFlow);
- радіобазові станції;
- транспортні ресурси 5G мережі;
- термінали 5G споживачів.

Розробка методики розрахунку, аналізу та оцінки параметрів якості в системі управління елементами контрольованого об'єкта (КО) на основі моделі взаємодії між кожним користувачем і RAP з підтримкою протоколу OpenFlow SDN платформи для 5G мережі є метою гарантії достовірної оцінки за вимогами виконання норм показників якості QoS:

- затримки передачі пакетів з кінця в кінець;
- вірогідності втрачених пакетів;
- характеристик короточасних перерв сигналів;
- захисту апаратного та програмного забезпечення елементів;
- інших збоїв.

Алгоритм обробки пакетів у протоколі OpenFlow на SDN платформі представлено на рис. 1. Контролер SDN забезпечує гнучке управління та вибір маршрутизатора для підключення всіх мереж радіодоступу (Radio Access Network, RAN) до основної 5G мережі, де базова мережа контролера SDLL складається з двох основних частин, як об'єкт єдиного управління (Unified Control Entity, UCE) та єдиний шлюз даних (Unified Data Gateway, UDW). Роль UCE полягає у визначенні правил управління в 5G мережі, таких як:

- об'єкт управління мобільністю (Mobility Management Entity, MME);
- площина управління шлюзом обслуговування (SGW-C);
- площина управління шлюзом пакетної передачі даних (Gateway Control Plane, PGW-C).

У цьому випадку UDW визначає правила для пересилання даних 5G мережі:

- площина даних шлюзу обслуговування (Service Gateway Data Plane, SGW-D);
- площина даних шлюзу пакетної передачі даних (Gateway Data Plane, PGW-D).

Для забезпечення гарантії стабільного з'єднання між кожним користувачем і RAP розробимо модель управління елементами на основі SDLL платформи для 5G мережі, яка буде забезпечувати необхідний взаємозв'язок між площиною даних і площиною управління.

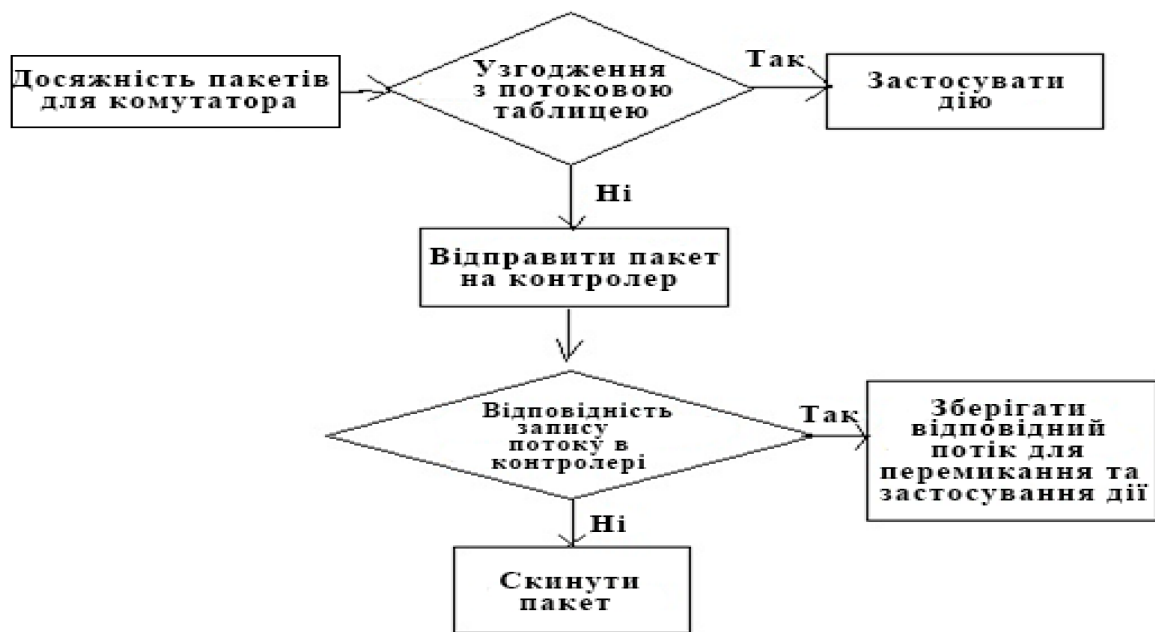


Рис. 1. Алгоритм обробки пакетів у протоколі OpenFlow на SDN платформі

Базуючись на головних вимогах системи якості QoS і SDN платформи запропоновано модель взаємодії між кожним користувачем і кожної точки радіодоступу (Radio Access Points, RAP) таким чином, що контролер SDN повинен динамічно регулювати смугу пропускання для RAP до модуля основної смуги (Baseband Unit, BBU) 5G мережі (рис. 2).

У запропонованій моделі площина управління, яка управляється мережними серверами, надає інструменти управління та оптимізації для площини даних, якою управляє базова 5G мережа. Вона складається з програмно визначених базових станцій (Software-Defined Base Stations, SD-BS) у RAN та програмно-визначених комутаторів (Software-Defined Switches, SD-switches). Контролер обслуговує фізичні, MAC (Medium Access Control) і мережні рівні функцій на комп'ютерах і віддалених центрах обробки даних. В свою чергу протокол OpenFlow підтримує три різні типи повідомлень. Повідомлення від контролера до комутатора є асинхронними та симетричними, ініціюються контролером і використовуються для перевірки стану та стану таблиці потоків комутаторів. Асинхронні повідомлення надсилаються від комутатора до контролера, що є подією та позначає зміну у стані комутатора або мережі.

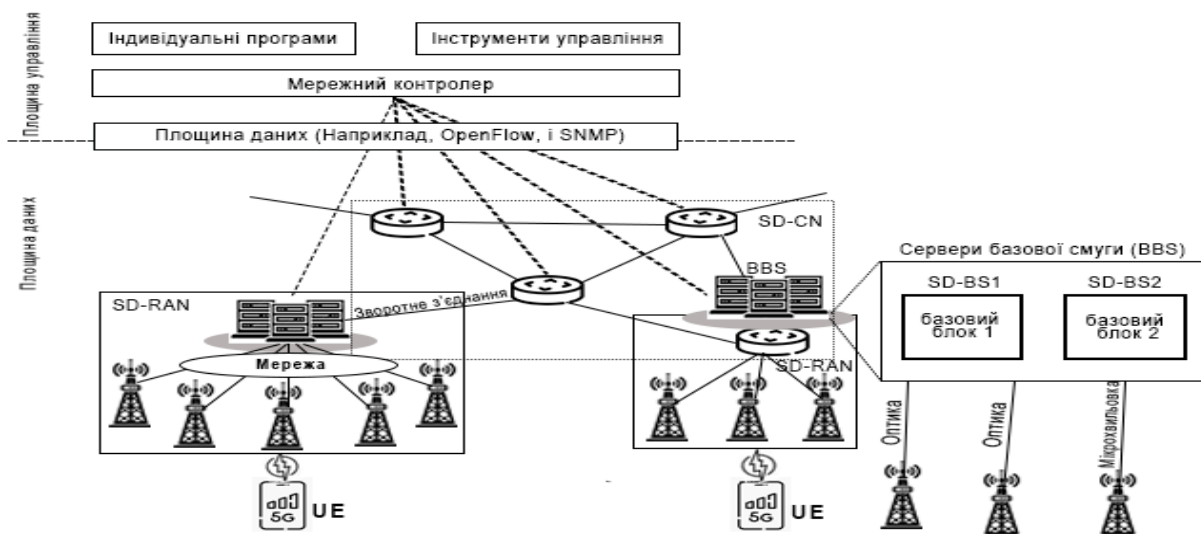


Рис. 2. Модель взаємодії користувачів і RAP на основі SDN платформи для 5G мережі

Серед багатьох подій дія Packet-in має важливе значення. Ця подія виникає, коли пакет не має відповідного запису в таблиці потоку. Повідомлення Packet-in надсилається до контролера, який приймає рішення про встановлення потоку для пакета, симетричні повідомлення надсилаються у будь-якому напрямку та використовуються для перевірки активності контролера. Коли пристрій із підтримкою Openflow намагається налаштувати себе вперше, він спочатку надсилає повідомлення синхронізації TCP на контролері TCP-порта за замовчуванням. Повідомлення підтвердження надсилається з обох сторін під час реалізації протоколу TCP між контролером і комутатором. Повідомлення реалізації протоколу TCP використовуються в процесі встановлення з'єднання. Після встановлення з'єднання між комутатором і контролером хости можуть спілкуватися з OpenFlow мережею.

Розрахунки показників якості, аналіз ймовірнісної-часової характеристики обробки інформації проводяться, як правило, в центрі обробки результатів даних розподіленої системи управління контрольованими об'єктами (КО) на основі моделі взаємодії користувачів і RAP з підтримкою протоколу OpenFlow SDN платформи для 5G мережі. Ліквідація проблем збоїв в роботі контролерів SDN платформи реалізуються прийняттям оперативних рішень для забезпечення норм надійності і безпеки функціонування об'єктів, що контролюються (КО). В центрі обробки результатів даних розподіленої системи управління контрольованими об'єктами OpenFlow SDN платформи для 5G мережі основними задачами являються проведення розрахунків нижче вказаних показників математичної моделі:

- математичного очікування, де T – це час обробки інформаційного повідомлення від вбудованого контролера, починаючи з моменту його ініціалізації в елементі КО до завершення циклу контролю та обробки його інформації в БД сервера, у т.ч. час передачі результатів обробки в БД протоколу OpenFlow SDN платформи;

- циклічного опитування K_i контролерів, які забезпечують контроль кожного елемента КО з запитом про стан показників якості при порівнянні з показниками норм;

- незалежність випадкової довжини черги – A_i в вихідному буфері K_i -го контролера в моменти опитування від випадкових процесів в інших об'єктах системи, побічно визначаються в сукупності випадковим середнім часом циклу опитування – $T_{\text{сер}}$.

Повідомлення від кожного i -го контролера надходять через випадковий час T_{A_i} з функцією розподілу $A_i(t)$ та інтенсивністю λ в системі управління ресурсами 5G мережі;

$$A_i(t) = P\{T_{A_i} \leq t\}, \quad (1)$$

$$\lambda_i = \frac{1}{E[T_{A_i}]}. \quad (2)$$

Тоді інтенсивність сумарного потоку:

$$\lambda_0 = \sum_{i=1}^K \lambda_i. \quad (3)$$

Тривалість обслуговування повідомлення від контролерів є випадковими величинами T_{B_i} з довільними функціями розподілу:

$$B_i(t) = P\{T_{B_i} \leq t\}. \quad (4)$$

$$E[T_{B_i}] = \int_0^{\infty} [1 - B_i(t)] dt = b_i \leq \infty. \quad (5)$$

Опитування контролерів проводиться циклічно, при чому при кожному зверненні обслуговується не більше одного повідомлення з буфера вихідного контролера. Оскільки буфером використовується пам'ять ОЗП, а від кожного контролера трафік відомий, то розмір буфера вибирається таким, що його можна вважати необмеженим. Процедура опитування контролера вимагає випадкового часу організації діалогу T_{D_i} з функцією розподілу:

$$D_i = E[T_{D_i}]. \quad (6)$$

У разі надходження інформаційного повідомлення від будь-якого контролера після його обробки потрібно передати результат його обробки в головний сервер протягом випадкового часу T_v і математичним сподіванням (середній час, який витрачається на обробку 1 заявки):

$$v = E[T_v]. \quad (7)$$

Нехай TR_i – час між двома послідовними зверненнями до вихідного буфера i -го контролера має функцію розподілу $R_i(t) = P\{TR_i \leq t\}$. Тоді математичне сподівання середнього часу циклу опитування:

$$r = d_0 \sum_{i=1}^K [(\lambda_i \cdot r) \cdot b_i + (\lambda_i \cdot r)v], \quad (8)$$

$$r = d_0 + r \cdot \sum_{i=1}^K [(\lambda_i \cdot b_i + \lambda_i \cdot v)],$$

$$r - r \cdot \sum_{i=1}^K [(\lambda_i \cdot b_i + \lambda_i \cdot v)] = d_0,$$

$$r \cdot (1 - \sum_{i=1}^K [(\lambda_i \cdot b_i + \lambda_i \cdot v)]) = d_0$$

$$r = \frac{d_0}{1 - \sum_{i=1}^K [(\lambda_i \cdot b_i + \lambda_i \cdot v)]} = \frac{d_0}{1 - (\sum_{i=1}^K \lambda_i \cdot b_i + \sum_{i=1}^K \lambda_i \cdot v)} =$$

$$= \frac{d_0}{1 - (\sum_{i=1}^K \rho_i + v \cdot \sum_{i=1}^K \lambda_i)},$$

$$r = \frac{d_0}{1 - (\rho_0 + v\lambda_0)}, \quad (9)$$

де d_0 – сумарний час опитування всіх буферів, ч; λ_i – інтенсивність навантаження мережі; $v = T$ – математичне сподівання опитування 1 контролера; b_i – номер контролера; K – загальна кількість контролерів SDN; $\rho_0 = \sum_{i=1}^K \rho_i$; $\rho_i = \lambda \cdot b_i$, $v = b_i T$; λ_0 – інтенсивність сумарного потоку.

Для аналізу та оцінки параметрів якості функціонування елементів КО в системі управління об'єктами запропонованої моделі проведемо розрахунки з використанням MATLAB (табл. 1).

Таблиця 1

Число контролерів b_i	Інтенсивність сумарного потоку λ	Час передачі повідомлень d , с	Час циклу опитування T_c
від 1 до 200 (з кроком 10)	від 0,1 до 1,0 (з кроком 0,1)	0,0012	0,001 для 1 контролера

Графіки залежності часу затримки циклу опитування від заданої кількості контролерів мережних елементів опитування.

І сценарій: при заданому циклу опитування, $T = 0,001$ с для 1 контролера і інтенсивності 0,1 сумарний час опитування в результаті зростає лінійно в умовах збільшення КО та кількості K . Мінімальне значення $r(k) = 0 \dots 0,05$ с фіксується для K від 1 до 40. Зріст навантаження викликає зріст часу затримки для циклу опитування. Тому максимального значення математичне сподівання досягає при $K=200$ для $r(k) = 0,2 \dots 0,35$ с в умовах залежності від інтенсивності надходження потоків. Мінімальне значення $r(k)$ краще вибирати при $K \leq 20$, що забезпечує час затримки, $r(k)=0.03$ с. Графіки залежності циклу середнього часу опитування від кількості мережних елементів представлені на рис. 3.

ІІ сценарій: при $T = 0,002$ с з інтенсивністю 0,1 сумарний час опитування при зростанні кількості елементів та контролерів також має лінійне зростання та при $K=140$ досягає 0,3 с.

Мінімальне значення математичного сподівання фіксується при K від 1 до 40 для $r(k) = 0,00001 \dots 0,1$ с. Зріст навантаження на контролери викликає збільшення часу затримки для циклу опитування. Тому максимального значення математичне сподівання досягає для $r(k) = 0,4 \dots 1,05$ с при $K = 200$ в умовах залежності від інтенсивності надходження потоків. Мінімальне значення $r(k)$ краще вибирати при $K \leq 20$, що забезпечує час затримки $r(k) = 0,005$ с. За результатами розрахунків представлено графіки залежності циклу середнього часу опитування від кількості мережних елементів на рис. 4.

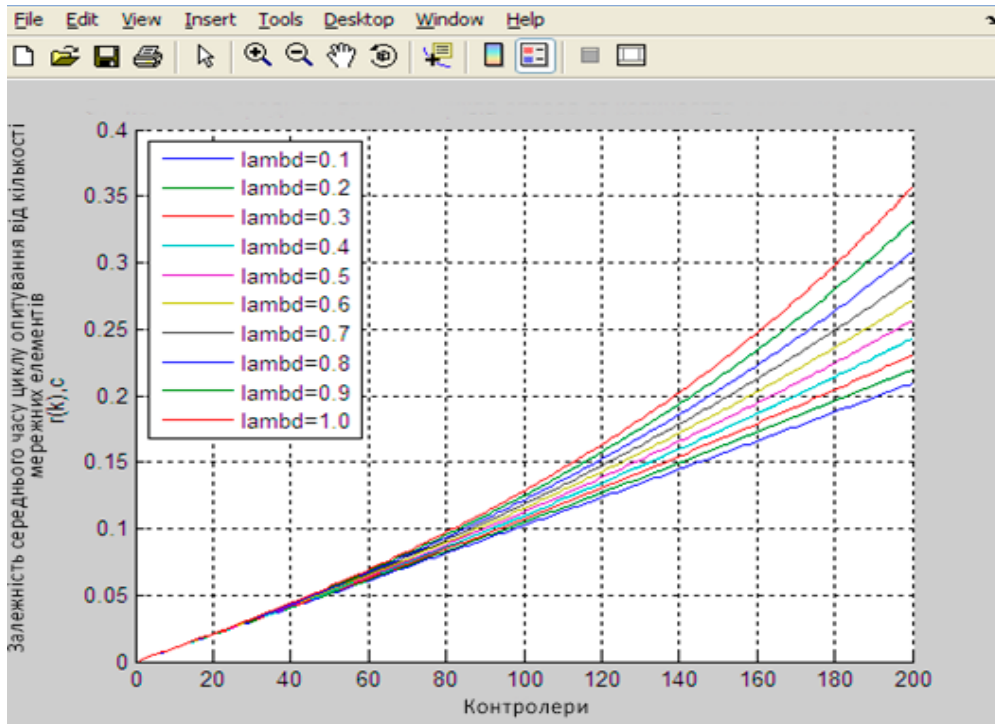


Рис. 3. Залежність числа K для середнього часу циклу опитування від кількості мережних елементів при $r(k) = 0,001 \dots 0,35$ с

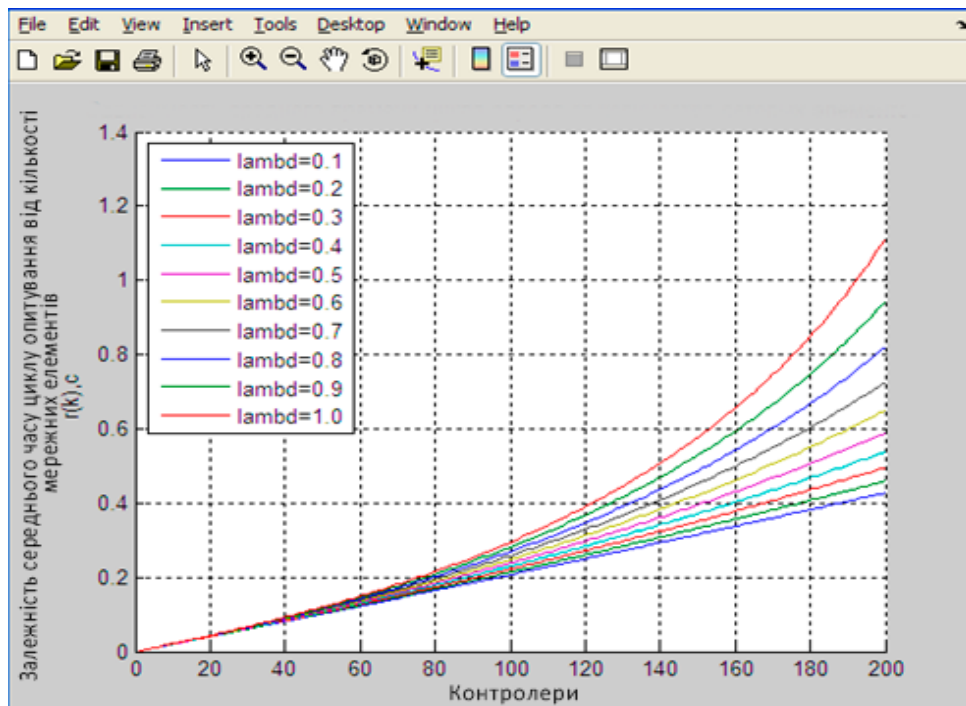


Рис. 4. Залежність числа K для середнього часу циклу опитування від кількості мережних елементів при $r(k) = 0,4 \dots 1,05$ с

III сценарій: при $T = 0,003$ с з інтенсивністю 0,1 сумарний час опитування при збільшенні кількості контролерів також має лінійне зростання, для $K = 140$ сумарний час опитування досягає 0,4с. Оптимальне значення $r(k)$ краще вибирати при середній кількості контролерів K від 140 до 180 для часу затримки 1 с, мінімальне значення $r(k) = 0 \dots 0,2$ с для K від 1 до 40. Зріст навантаження викликає зростання часу затримки для циклу опитування. Тому максимальне значення, $r(k) = 0,7 \dots 3,7$ с досягає при $K=200$ в умовах залежності від інтенсивності надходження потоків. Мінімальне значення $r(k)$ краще вибирати при $K \leq 20$, що забезпечує час затримки $r(k) = 0,1$ с. За результатами розрахунків представлені графіки залежності циклу середнього часу опитування від кількості мережних елементів на рис. 5.

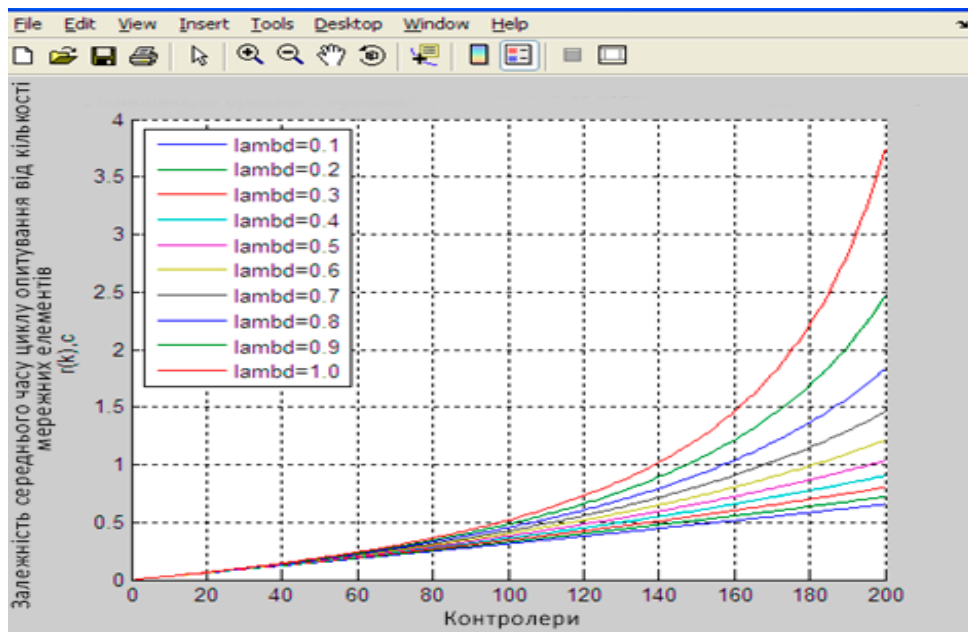


Рис. 5. Залежність числа K для середнього часу циклу опитування від кількості мережних елементів при $r(k) = 0,7 \dots 3,7$ с

В архітектурі SDN типові та поширені проблеми безпеки забезпечуються на рівнях SDN. Рівень додатків, також відомий як рівень управління, є найвищим рівнем в архітектурі SDN, всі бізнес-додатки та програми безпеки виконуються на цьому рівні. Додатки, контрольовані цим рівнем, включають реалізацію брандмауера, контроль доступу, балансування навантаження, систему запобігання вторгненням (Intrusion Prevention System, IPS), систему виявлення вторгнень (Intrusion Detection System, IDS) та віртуалізацію мережі.

Висновки

Результати математичного моделювання, розрахунки, аналіз графіків та оцінка даних показали ефективність системи управління на SDN платформі з протоколом OpenFlow. Для різних сценаріїв проведено моделювання з використанням пакету математичного моделювання MATLAB та визнано кращий сценарій конфігурації, а саме при $T=0,001$ с з інтенсивністю 0,1 сумарний час опитування при збільшенні кількості контролерів має лінійне зростання. Середній час в циклі опитування набуває мінімального значення при кількості контролерів не вище 20, що забезпечує час затримки $r(k) = 0,005$ с. Такі значення рекомендовано вибирати за результатами моделювання і вони відповідають 1 класу обслуговування 3GPP TS 23.501:5QI для QoS [3].

Таким чином, повне використання переваг системи управління повинно відповідати об'єкту моделі взаємодії між кожним користувачем і RAP на основі SDN платформи з використанням OpenFlow протоколу для 5G мережі. Такий підхід дозволяє системі управління в реальному часі контролювати використання і безпеку загальних ресурсів з нормованими параметрами надійності доступу до них.

Список літератури:

1. Introduction to 3GPP and 3GPP 5G Releases 15, 16 and 17. URL: <https://5g.security/miot-5g/5g-3gpp-releases-15-16-17>.
2. Barakabitze A., Barman N., hmad A., Zadtootaghaj S., Sun L., G. Martini M., Atzori L. QoE management of multimedia streaming services in future networks: A tutorial and survey // IEEE Commun. Surv. Tutor. 22(1) (2019). P.526-565.
3. ETSI TS 123 501 V16.6.0 (2020-10) URL: https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/123500_123599/123501/16.06.00_60/ts_123501v160600p.pdf.

Надійшла до редколегії 10.05.2025

Відомості про авторів:

Кадацька Ольга Йосипівна – канд. техн. наук, доцент, Харківський національний університет радіоелектроніки, доцент кафедри інфокомунікаційної інженерії ім. В.В. Поповського, Україна; e-mail: olga.kadatska@nure.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5331-4324>

Сабурова Світлана Олександрівна – Харківський національний університет радіоелектроніки, доцент кафедри інфокомунікаційної інженерії ім. В.В. Поповського, Україна; e-mail: svitlana.saburova@nure.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4001-1594>