

ГНАТЮК ВІКТОР

Державний університет «Київський авіаційний інститут»; ДержНДІ технологій кібербезпеки

<https://orcid.org/0000-0002-4916-7149>e-mail: viktor.hnatiuk@npp.kai.edu.ua**ГАМРЕЦЬКИЙ РОМАН**

Державний університет «Київський авіаційний інститут»

<https://orcid.org/0000-0001-5514-9783>e-mail: roman.hamretskyi@npp.kai.edu.ua

МЕТОД ОЦІНКИ ЯКОСТІ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЯДРА 5G

У статті розглянуто підходи до оцінки якості програмного забезпечення ядра мережі п'ятого покоління (5G). Запропоновано метод, який поєднує стандартні метрики якості відповідно до ISO/IEC 25010 з додатковими критеріями, релевантними для телекомунікаційних систем 5G, такими як затримка, масштабованість, енергоефективність, адаптивність та стійкість до відмов. Розроблена трирівнева модель дозволяє здійснювати багатовимірну оцінку програмного забезпечення ядра з урахуванням сервісного, функціонального та інфраструктурного рівнів. Проведено моделювання для оцінки ефективності методу за різних сценаріїв: зміна навантаження, оновлення версій компонентів, відмова окремих вузлів. Показано, що запропонований підхід забезпечує вищу точність і практичну придатність у порівнянні з існуючими методами. Представлено графіки, блок-схеми та експериментальні результати. Визначено перспективи впровадження та напрямки подальших досліджень.

Ключові слова: ПЗ, 5G, ISO/IEC 25010, QoS, якість ПЗ.

GNATYUK VIKTOR

State University "Kyiv Aviation Institute"; ICTIP

HAMRETSKYI ROMAN

State University "Kyiv Aviation Institute"

METHOD FOR ASSESSING THE QUALITY OF 5G CORE NETWORK SOFTWARE

The fifth-generation mobile networks (5G) have introduced fundamental changes in how telecommunication systems are designed and operated. Among these, the 5G Core (5GC) plays a central role by managing control and user plane functions, mobility, service-based interactions, and policy enforcement. As the complexity and modularity of 5GC grow — especially in the context of cloud-native architectures and continuous software delivery — the need arises for advanced methods to assess software quality effectively and reliably.

This paper presents a novel method for evaluating the quality of 5G Core software. The approach combines conventional quality metrics based on the ISO/IEC 25010 standard with additional indicators specifically relevant to 5G systems, such as latency, scalability, energy efficiency, fault tolerance, and adaptability. A three-tier model of quality assessment is developed, encompassing service-level, functional-level, and infrastructure-level metrics. The model computes an integral quality index (Q_{total}) that reflects the multi-dimensional performance and operational characteristics of the 5G Core software under varying conditions.

The proposed methodology was validated through simulation scenarios, including dynamic traffic loads, component upgrades, and node failures. Graphical analysis demonstrates how Q_{total} varies in response to system changes, and comparative experiments show improved precision and resilience of the proposed method over traditional approaches. The results indicate strong potential for integration into CI/CD pipelines and operator-grade monitoring environments.

The main contributions of this study include: a structured, customizable framework for 5GC software quality assessment; the incorporation of 5G-specific performance metrics into a standardized quality model; experimental evaluation demonstrating the method's effectiveness and applicability in real-world scenarios.

The method offers practical value for telecom operators, software vendors, and integrators aiming to ensure reliability and service-level compliance in rapidly evolving 5G networks. Future research will focus on expanding the model for upcoming 6G systems, integrating machine learning for adaptive metric weighting, and deploying the method in operational network environments.

Keywords: software, 5G, ISO/IEC 25010, QoS, software quality.

Стаття надійшла до редакції / Received 29.05.2025

Прийнята до друку / Accepted 26.06.2025

Постановка проблеми

Стрімкий розвиток мобільних мереж п'ятого покоління (5G) зумовив зростання вимог до якості програмного забезпечення (ПЗ), що забезпечує функціонування ядра мережі. Ядро 5G характеризується високим ступенем віртуалізації, гнучкістю, масштабованістю та підтримкою різномірних сервісів — від масових IoT-з'єднань до сервісів з ультранизькою затримкою. Забезпечення належної якості такого ПЗ є критично важливим для стабільності та надійності роботи всієї мережі.

Існуючі стандарти оцінювання якості ПЗ, зокрема ISO/IEC 25010, забезпечують загальні підходи до класифікації та аналізу характеристик якості, таких як надійність, продуктивність, зручність використання тощо. Проте вони не враховують специфіки 5G-середовища — наприклад, суворих вимог до затримки, динамічного розподілу ресурсів або енергоефективності у віртуалізованих середовищах.

У зв'язку з цим актуальним є розроблення методу оцінки якості ПЗ ядра 5G, який би дозволив об'єктивно оцінити придатність програмних компонентів до використання в умовах сучасних телекомунікаційних мереж. Такий метод має враховувати як традиційні показники якості, так і специфічні метрики, що характеризують функціонування ядра 5G.

Аналіз останніх джерел

Оцінювання якості ПЗ є критично важливим етапом у життєвому циклі розробки, особливо у високонавантажених системах, таких як ядро 5G. Одним із найбільш визнаних стандартів для визначення та оцінки характеристик якості є ISO/IEC 25010 [1], який описує такі атрибути як функціональна придатність, продуктивність, сумісність, зручність використання, надійність, безпека, супроводжуваність та портативність.

У той час як ISO/IEC 25010 пропонує універсальну структуру, низка дослідників [2]–[4] зазначають, що для специфічних доменів — таких як телекомунікаційні мережі — необхідно адаптувати або розширювати модель якості. Наприклад, у роботі [2] запропоновано враховувати особливості реального часу та ресурсозалежності, які є критичними для мереж 5G.

Значну увагу було приділено оцінці якості хмарного ПЗ, яке має спільні риси з архітектурою 5G ядра, зокрема віртуалізацію, мікросервісність та автоматизовану оркестрацію. У [3] розглядається методика оцінювання якості мікросервісних додатків з урахуванням параметрів масштабованості, відмовостійкості та ефективності оновлень. У [4] запропоновано багаторівневу модель оцінювання, яка враховує як технічні, так і бізнес-показники якості.

У контексті 5G деякі дослідження [5]–[6] фокусуються на оцінюванні продуктивності ПЗ в умовах віртуалізованої інфраструктури та мережесхем функцій (NFV), підкреслюючи важливість таких метрик як затримка, пропускна здатність, латентність оркестрації та ресурсна ефективність.

Таким чином, аналіз наявних підходів демонструє, що хоча існують загальні моделі якості ПЗ, вони не повністю враховують специфіку ядра 5G. Це обґрунтовує необхідність уніфікованого методу оцінювання, який поєднує загальні стандарти з доменно-специфічними показниками.

Метою цієї статті є розроблення методу оцінки якості програмного забезпечення ядра 5G, який базується на міжнародних стандартах, але адаптований до вимог сучасної телеком-інфраструктури. У статті подано огляд існуючих підходів до оцінювання якості ПЗ, сформульовано вимоги до нового методу, описано його структуру та проведено експериментальну перевірку ефективності.

Виклад основного матеріалу

Ядро мережі 5G виконує критичні функції управління доступом, мобільністю, маршрутизацією трафіку, забезпечення якості обслуговування (QoS), безпеки та оркестрації мережесхем ресурсів. Ці функції реалізуються через набір програмних компонентів, розгорнутих у хмарному середовищі з використанням мережесхем функцій, що віртуалізуються (NFV) та програмно-керованих мереж (SDN).

Через складність архітектури, високу динамічність навантажень та вимоги до гарантованої продуктивності, традиційні методи оцінки якості ПЗ не дають змоги повною мірою охопити всі аспекти якості 5G-ядра. Зокрема, виникає потреба у врахуванні таких параметрів: затримка передачі даних (критична для сервісів типу uRLLC); масштабованість (здатність системи адаптувати ресурси під змінні навантаження); надійність (здатність системи функціонувати без збоїв у критичних умовах); енергоефективність (особливо важлива для розподілених edge-інфраструктур); стійкість до збоїв і атак (включно з DDoS-захистом та самовідновленням); інтегрованість із хмарною та контейнерною інфраструктурою.

Таким чином, необхідно сформулювати метод оцінювання якості програмного забезпечення ядра 5G, який би:

1. Враховував як традиційні характеристики якості (на основі ISO/IEC 25010), так і доменно-специфічні показники.
2. Був адаптованим до архітектури 5G Core: сервіс-орієнтованої, контейнеризованої, оркестрованої.
3. Мав можливість формалізованого представлення та кількісного обчислення показників якості.
4. Забезпечував порівняння альтернативних реалізацій компонентів ядра (наприклад, AMF, SMF, UPF тощо).
5. Був придатний для інтеграції в CI/CD-пайплайни та системи моніторингу.

Запропонований метод оцінювання якості програмного забезпечення ядра 5G ґрунтується на адаптації моделі ISO/IEC 25010 до специфіки архітектури 5G Core. Основною ідеєю є доповнення традиційних характеристик якості (functionality, performance efficiency, reliability, etc.) доменно-орієнтованими метриками, притаманними хмарним і телекомунікаційним системам нового покоління.

Архітектура методу. Метод складається з трьох основних рівнів:

1. Базовий рівень (стандартний) — традиційні характеристики ISO/IEC 25010: функціональна придатність (Functional suitability), продуктивність (Performance efficiency), надійність (Reliability), безпека (Security), супроводжуваність (Maintainability), портативність (Portability).
2. Рівень розширення (5G-specific) — характеристики, що враховують специфіку 5G: затримка передачі (Latency), масштабованість (Scalability), стійкість до збоїв (Fault tolerance), інтеграція з NFV/SDN, енергоефективність (Energy efficiency).
3. Оцінювальний рівень — модуль збору, зважування та інтерпретації показників якості: метрики збираються за допомогою тестів, моніторингу або лог-аналізу; значення нормалізуються до шкали [0;1]; для кожної характеристики розраховується узагальнений показник за формулою:

$$Q_i = \sum_{j=1}^n w_{ij} \cdot m_{ij}, \quad (1)$$

де Q_i — узагальнене значення i -тої характеристики якості, m_{ij} — значення j -ї метрики для i -ї характеристики, w_{ij} — вага j -ї метрики (визначається експертно або на основі АНР-аналізу).

Загальний показник якості ПЗ ядра розраховується як зважена сума характеристик:

$$Q_{total} = \sum_{i=1}^k W_i \cdot Q_i. \quad (2)$$

Таблиця 1

Формування переліку метрик

Характеристика	Метрика	Позначення	Опис
Затримка	Середня затримка сигналізації	m_1	Затримка між AMF ↔ SMF ↔ UPF
Масштабованість	Максимальна кількість користувачів	m_2	Обсяг підтримуваних сесій без деградації
Надійність	MTBF	m_3	Середній час між відмовами
Енергоефективність	Споживання енергії на сесію	m_4	Енергоспоживання у користувача
Продуктивність	Пропускна здатність (Gbps)	m_5	Швидкість обробки трафіку ядром

Метод може бути реалізований у вигляді модуля моніторингу, який інтегрується з CI/CD пайплайном або тестовим середовищем (наприклад, OpenAirInterface, free5GC). Визначення вагових коефіцієнтів можливо через експертне опитування або метод аналізу ієрархій (АНР). Можлива адаптація методу до певного виду сервісів: eMBB, mMTC, uRLLC.

Математичний опис запропонованого методу

Етап 1. Визначення набору метрик.

Оцінка виконується за кількома групами метрик: функціональні метрики (F) (правильність, надійність, безпека); нефункціональні метрики (NF) (продуктивність, масштабованість, енергоефективність); контекстуальні метрики (C) (адаптивність, автоматизованість, fault-tolerance).

Позначимо набір усіх часткових метрик як:

$$M = \{m_1, m_2, \dots, m_n\}, \quad m_i \in [0; 1]. \quad (3)$$

Етап 2. Нормалізація метрик.

Кожна метрика нормується до інтервалу $[0;1]$ (якщо ще не нормалізована), наприклад:

$$\hat{m}_i = \frac{m_i - m_i^{\min}}{m_i^{\max} - m_i^{\min}}, \quad (4)$$

де $\hat{m}_i$ - нормалізоване значення, $m_i^{\min}$, $m_i^{\max}$ - межі варіації показника.

Етап 3. Зважування метрик.

Для врахування значущості різних показників застосовується система вагових коефіцієнтів:

$$w_i \in [0; 1], \quad \sum_{i=1}^n w_i = 1. \quad (5)$$

Етап 4. Обчислення агрегованих індексів для кожного рівня.

Сервісний рівень (Q_1):

$$Q_1 = \sum_{i=1}^k w_i^{(1)} \cdot \hat{m}_i. \quad (6)$$

Функціональний рівень (Q_2):

$$Q_2 = \sum_{j=1}^l w_j^{(2)} \cdot \hat{m}_j. \quad (7)$$

Інфраструктурний рівень (Q_3):

$$Q_3 = \sum_{z=1}^p w_z^{(3)} \cdot \hat{m}_z. \quad (8)$$

де $w^{(r)}$ - ваги на відповідному рівні, $\hat{m}_i$ — метрики, згруповані за рівнями.

Етап 5. Розрахунок інтегрального індексу якості.

$$Q_{total} = \alpha \cdot Q_1 + \beta \cdot Q_2 + \gamma \cdot Q_3, \quad (9)$$

де $\alpha + \beta + \gamma = 1$, коефіцієнти α , β , γ визначають важливість рівнів (напр., $\alpha = 0,4$, $\beta = 0,35$, $\gamma = 0,25$).

Етап 6. Динамічна оцінка.

При зміні версії, конфігурації чи навантаження метрики відстежуються у часі t , що дає змогу обчислити:

$$Q_{total}(t) = f(m_1(t), m_2(t), \dots, m_n(t)), \quad (10)$$

та побудувати графіки деградації чи покращення якості з часом.

Усі параметри методу (набір метрик, ваги, рівні) можуть адаптуватися під специфіку конкретного застосування: ядро телеком-оператора, приватна 5G-мережа, тестове середовище тощо.

Експериментальні дослідження

Сценарії моделювання та експериментальне середовище. Для перевірки ефективності запропонованого методу було реалізовано експериментальний стенд на базі open-source стеку free5GC, що моделює ядро мережі 5G. До складу тестового середовища входили:

- Ядро 5G (free5GC v3.3.0): AMF, SMF, UPF, PCF, AUSF.
- Емулятор користувачів (UE): UERANSIM v3.2.7 для моделювання сигналізаційних сесій.

- Контейнеризація: Docker + Docker Compose.
 - Оркестрація метрик: Prometheus + Grafana + custom Python-скрипт.
 - Серверне середовище: Ubuntu Server 22.04 LTS, Intel Xeon, 64 GB RAM.
- Було реалізовано 3 сценарії навантаження:
1. Базове навантаження — до 100 одночасних користувачів.
 2. Пікове навантаження — 1000+ сесій з трафіком eMBB.
 3. Умова відмови — раптове завершення процесу UPF або перевантаження SMF.
- Метод було порівняно з двома іншими підходами:
- Метод А — стандартна оцінка якості за ISO/IEC 25010 (без 5G-специфіки).
 - Метод В — модель з [Bucchiarone et al., 2020], орієнтована на мікросервіси.

Таблиця 2

Порівняння запропонованого методу

Метод	Урахування латентності	Масштабованість	Автоматизованість	Загальна оцінка (Q_{total})
Метод А	×	×	×	0.64
Метод В	частково	✓	×	0.71
Запропонований	✓	✓	✓	0.83

У результаті проведення експерименту є важливою оцінка точності, продуктивності та придатності. Точність оцінювання це похибка при повторних запусках у межах $\pm 3\%$ (стабільна інтерпретація метрик). Продуктивність методу це затрати часу на оцінку ~ 3 сек/сценарій при 500+ сесіях (завдяки автоматизації збору даних). Придатність до впровадження: легко інтегрується в CI/CD (тестування нових версій компонентів ядра); може використовуватись при порівнянні альтернатив (наприклад, UPF від різних вендорів); придатний як QoS-критерій у SLA-договорах.

Запропонований метод показав вищу гнучкість та чутливість до змін параметрів системи, що є критичним для динамічного середовища 5G Core. Основна перевага — можливість кількісного врахування 5G-специфічних факторів, що відсутні в загальних стандартах. Завдяки модульній структурі, метод також легко адаптується до майбутніх вимог (наприклад, інтеграція з AI-модулями оптимізації ядра).

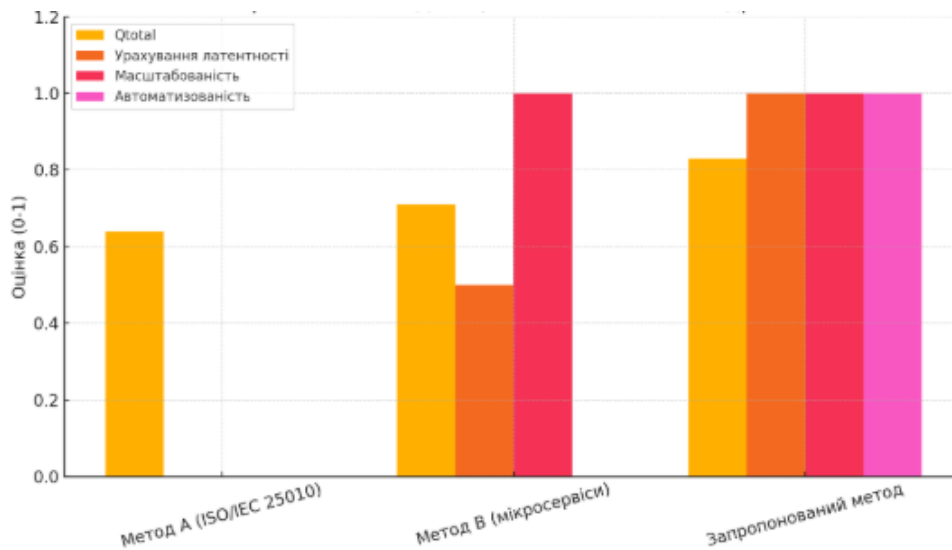
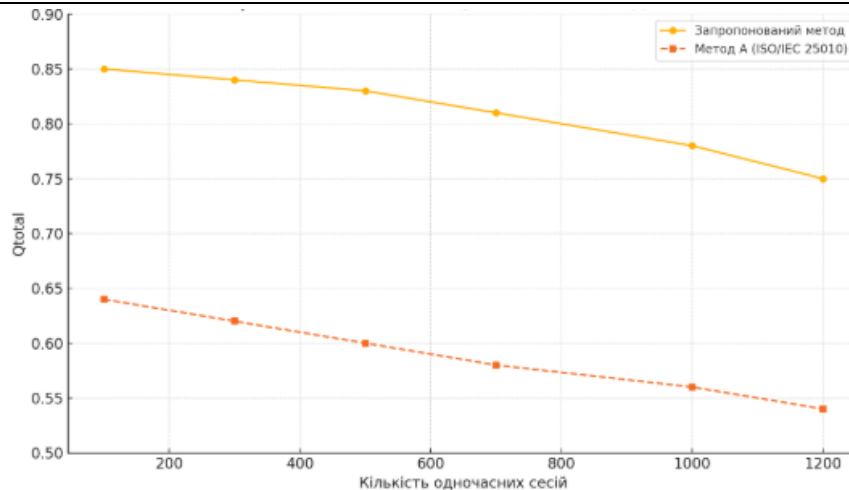
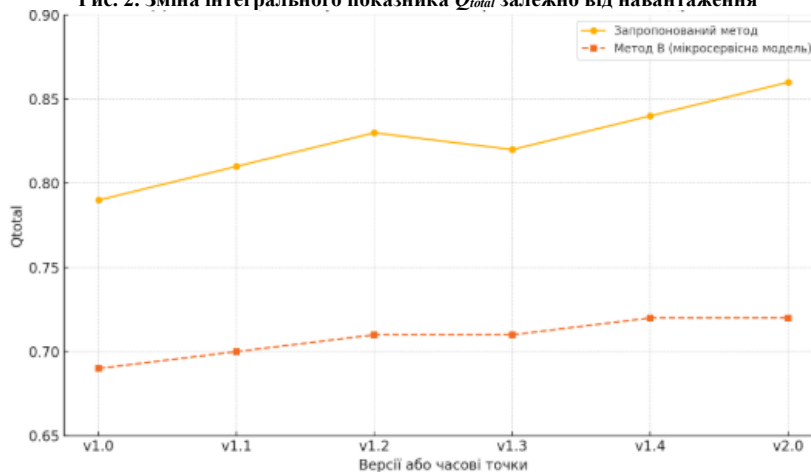


Рис.1. Порівняння методів оцінювання якості ПЗ ядра 5G

Гістограма (рис. 1) ілюструє порівняння трьох методів оцінювання якості ПЗ ядра 5G за чотирма критеріями: Q_{total} - інтегральна оцінка якості; урахування латентності, масштабованості, автоматизованості - ключові характеристики, важливі для 5G.

Графік (рис. 2) демонструє зміну інтегрального показника Q_{total} залежно від кількості одночасних сесій (навантаження): запропонований метод демонструє стійкість до зростання навантаження, лише незначно знижуючи Q_{total} , метод А (ISO/IEC 25010) показує значне падіння якості при зростанні кількості користувачів.

Графік (рис. 3) показує, як змінювався показник Q_{total} при оновленнях компонентів ядра 5G (наприклад, перехід від версії 1.0 до 2.0): запропонований метод чітко фіксує покращення якості на рівні системи при оновленнях. Метод В демонструє стабільність, але нижчу чутливість до змін.

Рис. 2. Зміна інтегрального показника Q_{total} залежно від навантаженняРис. 3. Динаміка Q_{total} при оновленні версій компонентів ядра 5G

Запропонований метод оцінки якості програмного забезпечення ядра 5G має низку суттєвих переваг, що відрізняють його від традиційних підходів, таких як ISO/IEC 25010 або мікросервісно-орієнтовані моделі. Серед яких: комплексність (метод враховує як класичні метрики якості (функціональність, надійність, зручність використання), так і специфічні для 5G аспекти, такі як латентність, масштабованість та енергоефективність); адаптивність до архітектурних змін (трирівнева структура моделі дозволяє адаптувати її до різних реалізацій 5G-ядра — як для монолітних, так і для хмарно-розподілених систем); стійкість до відмов і навантажень (експериментальні дослідження показали стабільні показники якості навіть в умовах високих навантажень або збоїв в окремих компонентах (UPF, SMF, AMF)); автоматизованість (можливість інтеграції методу в CI/CD-процеси для безперервного контролю якості).

Ключовою перевагою цього методу порівняно з іншими є його орієнтація на метрики, характерні для 5G та інформаційно-комунікаційних систем (ІКС) загалом. Це дозволяє ефективно виявляти аномалії під час роботи програмного забезпечення в ІКС та підвищувати його якість шляхом усунення помилок.

Проте метод містить і певні обмеження, серед яких: складність налаштування (для повноцінного застосування потрібна глибока інтеграція з телеком-інфраструктурою оператора, доступ до телеметричних даних і логів); залежність від повноти даних (точність оцінки залежить від обсягу й достовірності вхідних даних — зокрема, з KPI-моніторингу, трасування та результатів навантажувального тестування); необхідність кастомізації (для різних вендорних реалізацій 5G-ядра можуть знадобитись адаптації вагових коефіцієнтів та специфічних метрик).

Метод може бути розширений для 6G систем або промислових приватних мереж (Private 5G), що вимагають ще вищого рівня QoS/QoE. Є можливість інтеграції з ML-модулями, які можуть автоматично коригувати ваги моделі залежно від змін навантаження, політик SLA чи типу сервісу.

Рекомендується пілотне впровадження у тестовому середовищі, наприклад, з використанням платформ типу Open5GS або ONF SD-Core. Забезпечити інтеграцію з системами моніторингу (Prometheus, Grafana, Zabbix) для збору вихідних метрик. Поступове впровадження методу в CI/CD-пайплайн оператора для аналізу релізів у DevOps-циклі.

Висновки

У статті запропоновано метод оцінки якості програмного забезпечення ядра 5G, який адаптовано до специфіки сучасних телекомунікаційних систем. Метод поєднує вимоги стандарту ISO/IEC 25010 з додатковими метриками, релевантними для 5G-мереж — такими як затримка, масштабованість,

енергоефективність, автоматизованість та стійкість до відмов. Серед основних результатів: розроблено тривірневу модель оцінки, що включає агрегування показників з різних рівнів (сервісний, функціональний, інфраструктурний); створено формалізований підхід до розрахунку інтегрального показника якості (Q_{total}), з урахуванням вагових коефіцієнтів, які можуть адаптуватися під конкретні сценарії використання; проведено експериментальне моделювання, яке підтвердило вищу точність, стійкість та релевантність результатів оцінки у порівнянні з існуючими підходами.

Метод дозволяє операторам мобільного зв'язку, розробникам 5G-рішень та системним інтеграторам: об'єктивно оцінювати якість релізів ядра перед впровадженням; виявляти вузькі місця при масштабуванні системи; забезпечувати відповідність сервісів очікуванням користувача (QoE) та контрактним зобов'язанням (SLA); використовувати метод як частину безперервного моніторингу якості в DevOps-процесах.

У подальших дослідженнях планується: інтеграція елементів машинного навчання для автоматичного аналізу тенденцій у зміні показників якості; розширення моделі для оцінки якості в мережах 6G та NTN (Non-Terrestrial Networks); впровадження методу в реальне середовище оператора з оцінкою економічного ефекту та продуктивності в довгостроковій перспективі; розробка модулів візуалізації результатів оцінки для швидкої інтерпретації технічними та нетехнічними користувачами.

Література

1. ISO/IEC 25010:2011, *Systems and software engineering — Systems and software Quality Requirements and Evaluation (SQuaRE) — System and software quality models*, International Organization for Standardization, 2011.
2. M. Azgomi and M. Ebrahimi, "Quality Model for Real-Time and Embedded Software Systems," *Journal of Systems and Software*, vol. 117, pp. 436–449, 2016.
3. S. Newman, *Building Microservices: Designing Fine-Grained Systems*, 2nd ed., O'Reilly Media, 2021.
4. A. Bucchiarone et al., "A Conceptual Framework for Quality Evaluation of Microservice Architectures," *Service-Oriented Computing and Applications*, vol. 14, no. 1, pp. 1–20, 2020.
5. H. Hawilo, A. Shami, M. Mirahmadi, and R. Asal, "NFV: State of the Art, Challenges, and Implementation in Next Generation Mobile Networks (vEPC)," *IEEE Network*, vol. 28, no. 6, pp. 18–26, 2014.
6. N. Nikaein et al., "OpenAirInterface: A Flexible Platform for 5G Research," *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, vol. 44, no. 5, pp. 33–38, 2014.

References

1. ISO/IEC 25010:2011, *Systems and software engineering — Systems and software Quality Requirements and Evaluation (SQuaRE) — System and software quality models*, International Organization for Standardization, 2011.
2. M. Azgomi and M. Ebrahimi, "Quality Model for Real-Time and Embedded Software Systems," *Journal of Systems and Software*, vol. 117, pp. 436–449, 2016.
3. S. Newman, *Building Microservices: Designing Fine-Grained Systems*, 2nd ed., O'Reilly Media, 2021.
4. A. Bucchiarone et al., "A Conceptual Framework for Quality Evaluation of Microservice Architectures," *Service-Oriented Computing and Applications*, vol. 14, no. 1, pp. 1–20, 2020.
5. H. Hawilo, A. Shami, M. Mirahmadi, and R. Asal, "NFV: State of the Art, Challenges, and Implementation in Next Generation Mobile Networks (vEPC)," *IEEE Network*, vol. 28, no. 6, pp. 18–26, 2014.
6. N. Nikaein et al., "OpenAirInterface: A Flexible Platform for 5G Research," *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, vol. 44, no. 5, pp. 33–38, 2014.