МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «КИЇВСЬКИЙ АВІАЦІЙНИЙ ІНСТИТУТ»

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

ГАМРЕЦЬКИЙ РОМАН МИХАЙЛОВИЧ

УДК 621.39:004.7:004.41

ДИСЕРТАЦІЯ
МЕТОДИ ТА МОДЕЛІ ОЦІНКИ ЯКОСТІ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ В ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ СИСТЕМАХ

Спеціальність 172 «Телекомунікації та радіотехніка»
Галузь знань 17 «Електроніка та телекомунікації»

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

_____ Р. М. Гамрецький

Науковий керівник:
Гнатюк Віктор Олександрович,
кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри
телекомунікаційних та радіоелектронних систем НУ «КАІ»

Київ – 2026

АНОТАЦІЯ

Гамрецький Роман Михайлович. Методи та моделі оцінки якості програмного забезпечення в інформаційно-комунікаційних системах – кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю 172 «Телекомунікації та радіотехніка» галузі знань 17 «Електроніка та телекомунікації». Національний університет «Київський авіаційний інститут» Міністерства освіти і науки України. – Київ, 2026.

Дисертацію присвячено розв'язанню актуальної науково-практичної задачі оцінювання якості програмного забезпечення (ПЗ) в інформаційно-комунікаційних системах (ІКС). Актуальність дослідження зумовлена зростанням ролі ПЗ як ключового компонента сучасних телекомунікаційних, розподілених, хмарних, сервісно-орієнтованих та авіаційних ІКС. У таких системах якість ПЗ визначає не лише відповідність програмного продукту вимогам, а й надійність, кібербезпеку, резильєнтність, масштабованість, якість обслуговування, якість сприйняття сервісу користувачем та здатність системи зберігати працездатність за змінного навантаження й мережевих впливів.

У роботі обґрунтовано, що традиційні підходи до оцінювання якості ПЗ, зокрема стандартизовані моделі, процесно-орієнтовані підходи, класичні атрибутивні моделі та окремі метричні методики, формують важливу методологічну основу, проте недостатньо враховують експлуатаційну динаміку ІКС. Основна ідея дослідження полягає у поєднанні статичних характеристик програмного продукту з динамічними операційними показниками функціонування системи, а також у доменній адаптації метричного апарату для ПЗ ядра 5G.

Мета дисертаційного дослідження полягає у підвищенні точності, об'єктивності та практичної придатності оцінювання якості ПЗ в ІКС шляхом розроблення комплексної моделі та доменно-орієнтованого методу, що враховують взаємозв'язок між статичними характеристиками програмного

продукту та його динамічними операційними показниками в умовах змінного навантаження.

Для досягнення поставленої мети дослідження проаналізовано сучасний стан проблеми оцінювання якості ПЗ в ІКС; систематизовано стандарти, методології, моделі та метричні підходи; сформовано узгоджену систему статичних і динамічних метрик; обґрунтовано засади нормалізації, зважування, агрегування, адаптивного коригування вагових коефіцієнтів та інтерпретації різнорідних показників; розроблено комплексну модель оцінювання якості ПЗ в ІКС; запропоновано доменно-орієнтований метод оцінювання якості ПЗ ядра 5G; проведено експериментальну перевірку запропонованих рішень у середовищах, наближених до умов експлуатації ІКС; оцінено практичну придатність результатів для підтримки прийняття рішень щодо контролю якості, виявлення деградації, порівняння конфігурацій, оптимізації програмних компонентів та інтеграції процедур оцінювання якості в процеси розроблення, тестування й експлуатаційного моніторингу.

Методологічну основу дослідження становлять методи системного аналізу та порівняння для аналізу існуючих підходів; методи формалізації та математичного моделювання для визначення метрик і побудови інтегральної оцінки; підходи багатокритеріального оцінювання для агрегування показників якості; експериментальні методи для валідації запропонованих рішень із використанням керованої емуляції мережевих характеристик, інструментального моніторингу, середовищ free5GC, UERANSIM, Proxmox VE, NetEm та аналізу показників функціонування програмних компонентів ІКС.

У першому розділі здійснено аналіз методів, моделей і метричних підходів до оцінювання якості ПЗ в ІКС. Розглянуто особливості розроблення та впровадження ПЗ у розподілених, віртуалізованих, мережевих і сервісно-орієнтованих середовищах; проаналізовано нормативну основу оцінювання якості в межах сімейства стандартів SQuaRE та ISO/IEC 25010; узагальнено сучасні методології оцінювання якості ПЗ; визначено обмеження існуючих підходів щодо урахування динамічних параметрів функціонування ІКС.

У другому розділі сформовано метричну основу дослідження. Визначено статичні метрики, що характеризують продуктові властивості ПЗ, зокрема функціональну повноту, контроль доступу, модульність, складність і адаптивність. Розглянуто динамічні метрики, що відображають фактичну поведінку ПЗ під час функціонування, зокрема затримку, пропускну здатність, втрати пакетів, доступність, відновлюваність, масштабованість та інші показники експлуатаційної якості. Обґрунтовано взаємозв'язок статичних і динамічних метрик, а також методичні аспекти їх нормалізації, зважування та інтерпретації.

У третьому розділі розроблено комплексну модель оцінювання якості ПЗ в ІКС та доменно-орієнтований метод оцінювання якості ПЗ ядра 5G. Комплексна модель передбачає інтеграцію статичної та динамічної складових через нормалізацію, зважування та агрегування показників у загальний інтегральний індекс якості. Доменно-орієнтований метод для 5G Core враховує особливості сервісно-орієнтованої архітектури, взаємодії мережевих функцій AMF, SMF, UPF та інших компонентів, а також доменно-специфічні показники, пов'язані із затримкою сигналізації, масштабованістю, доступністю, відмовостійкістю, якістю площини користувача, QoS/QoE та функціонуванням телекомунікаційного ядра.

У четвертому розділі виконано експериментальну перевірку запропонованої комплексної моделі та доменно-орієнтованого методу. Доменний метод оцінювання якості ПЗ ядра 5G перевірено на стенді free5GC з емуляцією користувацького навантаження за допомогою UERANSIM, зокрема для сценаріїв 100, 300 та 500 UE. Комплексну модель оцінки якості ПЗ в ІКС перевірено у віртуалізованому середовищі Proxmox VE із використанням NetEm на прикладі SDN-контролера, мікросервісу автентифікації та IoT-компонента. Результати експериментів підтвердили працездатність, чутливість і практичну придатність запропонованих рішень у межах перевірених сценаріїв.

У дисертаційній роботі здобуто такі нові наукові результати:

1. Вперше запропоновано доменно-орієнтований метод комплексної оцінки якості ПЗ ядра 5G-мереж, який, на відміну від існуючих, ґрунтується на поєднанні базових метрик стандарту ISO/IEC 25010 із доменно-специфічними показниками сучасних телекомунікаційних систем (затримка сигналізації, масштабованість, енергоефективність на сесію). Це дозволяє здійснювати багатовимірну оцінку програмних компонентів (AMF, SMF, UPF) з урахуванням сервісного, функціонального та інфраструктурного рівнів.

2. Удосконалено метод розрахунку інтегрального показника якості ПЗ шляхом запровадження алгоритму адаптивного коригування вагових коефіцієнтів. На відміну від статичного зважування, такий підхід забезпечує автоматичний перерахунок значущості динамічної складової при виникненні мережевих аномалій або критичних стрибків навантаження, що підвищує точність і швидкість виявлення деградації сервісів.

3. Вперше розроблено комплексну багаторівневу модель інтегральної оцінки якості ПЗ ІКС, яка, на відміну від традиційних підходів, поєднує статичні характеристики програмного продукту з динамічними операційними метриками (пропускна здатність, втрати пакетів, час реакції). Використання цієї моделі дозволяє кількісно визначати розрив між формально задекларованою якістю ПЗ та його фактичною ефективністю в умовах розподілених мереж під навантаженням.

4. Дістали подальшого розвитку критеріальні моделі оцінювання якості ПЗ для сучасних ІКС. Завдяки розробленому багатофакторному підходу формалізовано інтеграцію специфічних показників кібербезпеки, енергоспоживання та стійкості мікросервісів у класичні референтні моделі ISO/IEC 25010, CMMI та FURPS+, що створює теоретичне підґрунтя для їх застосування в середовищах IoT, SDN та хмарних обчислень.

Практичне значення одержаних результатів полягає у можливості застосування запропонованих моделі та методу під час розроблення, впровадження, тестування й експлуатації ПЗ в ІКС. Результати можуть бути використані для порівняння альтернативних реалізацій і конфігурацій

програмних компонентів, контролю якості в умовах змінного навантаження, виявлення деградації характеристик, підтримки прийняття рішень щодо масштабування та оптимізації, а також для інтеграції процедур оцінювання якості в CI/CD-пайплайни та системи експлуатаційного моніторингу.

Окремі результати дисертаційної роботи впроваджено у навчальний процес кафедри телекомунікаційних та радіоелектронних систем, а також у практичну діяльність ТОВ «СМАРТ ПАВЕР», що підтверджено відповідними актами впровадження.

Ключові слова: якість програмного забезпечення, оцінювання якості програмного забезпечення, інформаційно-комунікаційна система, телекомунікаційна система, телекомунікаційна мережа, модель оцінювання якості програмного забезпечення, метод оцінювання якості програмного забезпечення, комплексна модель оцінювання якості, доменно-орієнтований метод, статичні та динамічні метрики якості, інтегральний показник якості, кібербезпека, резильєнтність, надійність, відмовостійкість, експлуатаційний моніторинг, ISO/IEC 25010, SQuaRE, 5G Core, SDN/NFV, мережевий зріз, QoS, QoE, авіаційна інформаційно-комунікаційна система.

ABSTRACT

Hamretskyi Roman Mykhailovych. Methods and Models for Software Quality Assessment in Information and Communication Systems – qualifying scientific work presented as a manuscript.

Thesis for the degree of Doctor of Philosophy in specialty 172 “Telecommunications and Radio Engineering”, field of knowledge 17 “Electronics and Telecommunications”. National University “Kyiv Aviation Institute” of the Ministry of Education and Science of Ukraine. – Kyiv, 2026.

The thesis is devoted to solving an important scientific and practical problem of software quality assessment in information and communication systems (ICS). The relevance of the research is determined by the increasing role of software as a key component of modern telecommunication, distributed, cloud-based, service-oriented, and aviation ICS. In such systems, software quality determines not only compliance with functional requirements, but also reliability, cybersecurity, resilience, scalability, quality of service, quality of experience, and the ability of the system to maintain operability under variable load and network impacts.

The thesis substantiates that conventional approaches to software quality assessment, including standardized quality models, process-oriented approaches, classical attribute-based models, and individual metric-based methods, provide an important methodological foundation but do not sufficiently take into account the operational dynamics of ICS. The main idea of the research is to integrate static characteristics of a software product with dynamic operational indicators of system behavior and to adapt the metric framework to the domain of 5G Core software.

The aim of the thesis is to improve the accuracy, objectivity, and practical applicability of software quality assessment in ICS by developing a comprehensive model and a domain-oriented method that take into account the relationship between static characteristics of a software product and its dynamic operational indicators under variable load.

To achieve the research aim, the thesis analyzes the current state of software quality assessment in ICS; systematizes standards, methodologies, models and metric-based approaches; forms a consistent set of static and dynamic metrics; substantiates the methodological principles of normalization, weighting, aggregation, adaptive adjustment of weighting coefficients and interpretation of heterogeneous indicators; develops a comprehensive model for software quality assessment in ICS; proposes a domain-oriented method for assessing the quality of 5G Core software; experimentally validates the proposed solutions in environments close to real ICS operation; and evaluates the practical applicability of the results for quality control, degradation detection, configuration comparison, optimization of software components and integration of assessment procedures into development, testing and operational monitoring processes.

The methodological basis of the research includes system analysis and comparison methods for reviewing existing approaches; formalization and mathematical modeling methods for defining metrics and constructing an integral quality assessment; multi-criteria assessment approaches for aggregating quality indicators; and experimental methods for validating the proposed solutions through controlled emulation of network characteristics, instrumental monitoring, and analysis of software component behavior using free5GC, UERANSIM, Proxmox VE and NetEm environments.

The first chapter analyzes methods, models, and metric-based approaches to software quality assessment in ICS. It considers the specifics of software development and deployment in distributed, virtualized, networked, and service-oriented environments; analyzes the normative basis of quality assessment within the SQuaRE family of standards and ISO/IEC 25010; summarizes modern software quality assessment methodologies; and identifies the limitations of existing approaches in terms of accounting for the dynamic operational parameters of ICS.

The second chapter develops the metric basis of the research. It defines static metrics that characterize product-related software properties, including functional completeness, access control, modularity, complexity, and adaptability. Dynamic

metrics are considered indicators that reflect the actual behavior of software during operation, including latency, throughput, packet loss, availability, recoverability, scalability, and other operational quality indicators. The chapter also substantiates the relationship between static and dynamic metrics and the methodological aspects of their normalization, weighting, and interpretation.

The third chapter presents the developed comprehensive model for software quality assessment in ICS and the domain-oriented method for assessing the quality of 5G Core software. The comprehensive model integrates static and dynamic components through the normalization, weighting, and aggregation of indicators into a general integral quality index. The domain-oriented method for 5G Core takes into account the specifics of service-based architecture, the interaction of AMF, SMF, UPF, and other network functions, as well as domain-specific indicators related to signaling latency, scalability, availability, fault tolerance, user-plane quality, QoS/QoE, and the operation of the telecommunication core.

The fourth chapter provides an experimental validation of the proposed comprehensive model and domain-oriented method. The method for assessing the quality of 5G Core software is validated on a free5GC testbed with user load emulation using UERANSIM, including scenarios with 100, 300, and 500 UEs. The comprehensive software quality assessment model for ICS is validated in a Proxmox VE virtualized environment using NetEm on the example of an SDN controller, an authentication microservice, and an IoT component. The experimental results confirm the operability, sensitivity, and practical applicability of the proposed solutions within the evaluated scenarios.

The following new scientific results were obtained in the dissertation:

1. For the first time, a domain-oriented method for the comprehensive assessment of 5G Core network software quality has been proposed. Unlike existing approaches, the method is based on combining basic ISO/IEC 25010 metrics with domain-specific indicators for modern telecommunication systems, such as signaling latency, scalability, and energy efficiency per session. This enables a multidimensional

assessment of software components, including AMF, SMF, and UPF, across service, functional, and infrastructure levels.

2. The method for calculating the integral software quality indicator has been improved by introducing an algorithm for the adaptive adjustment of weighting coefficients. In contrast to static weighting, this approach automatically recalculates the significance of the dynamic component when network anomalies or critical load spikes occur, thereby increasing the accuracy and speed of service degradation detection.

3. For the first time, a comprehensive multi-level model for the integral assessment of software quality in ICS has been developed. Unlike traditional approaches, the model combines static characteristics of the software product with dynamic operational metrics, such as throughput, packet loss, and response time. The use of this model enables the quantitative determination of the gap between formally declared software quality and its actual performance in distributed networks under load.

4. Criterion-based models for software quality assessment in modern ICS have been further developed. Owing to the proposed multifactor approach, the integration of specific cybersecurity, energy consumption, and microservice resilience indicators into the classical reference models ISO/IEC 25010, CMMI, and FURPS+ has been formalized, providing a theoretical basis for their application in IoT, SDN, and cloud computing environments.

The practical significance of the obtained results lies in the possibility of applying the proposed model and method during the development, implementation, testing, and operation of software in ICS. The results can be used to compare alternative implementations and configurations of software components, to control quality under variable load conditions, to detect degradation of characteristics, to support decision-making on scaling and optimization, and to integrate quality assessment procedures into CI/CD pipelines and operational monitoring systems.

Selected results of the dissertation have been implemented in the educational process of the Department of Telecommunications and Radioelectronic Systems, as

well as in the practical activities of SMART POWER LLC, as confirmed by the relevant implementation acts.

Keywords: software quality, software quality assessment, information and communication system, telecommunication system, telecommunication network, software quality assessment model, software quality assessment method, comprehensive quality assessment model, domain-oriented method, static and dynamic quality metrics, integral quality indicator, cybersecurity, resilience, reliability, fault tolerance, operational monitoring, ISO/IEC 25010, SQuaRE, 5G Core, SDN/NFV, network slicing, QoS, QoE, aviation information and communication system.

Список публікацій здобувача за темою дисертації

1. Гамрецький Р. М., Гнатюк В. О. Огляд та аналіз методів та моделей оцінки якості програмного забезпечення в інформаційно-комунікаційних системах. *Наукоємні технології.* 2024. № 4(64). С. 435–448. DOI: https://doi.org/10.18372/2310-5461.63.19752.

2. Гамрецький Р., Гнатюк В. Метод оцінки якості програмного забезпечення ядра 5G. *Herald of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences. 2025.* Т. 355, № 4(355). С. 106–111. DOI: https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-355-15.

3. Gnatyuk V., Batrak O., Hamretskyi R., Golovan M. Organizational and technical support of cyber security using a virtual assistant. *Cyber Hygiene & Conflict Management in Global Information Networks 2024 (CH&CMiGIN 2024). CEUR Workshop Proceedings*. 2025. Vol. 3925. P. 317–324. DOI: https://doi.org/10.5281/zenodo.19119346. ISSN 1613-0073.

4. Gnatyuk V., Hamretskyi R. A domain-oriented method for evaluating 5G core network software quality. *Cyber Security and Data Protection 2025 (CSDP 2025). CEUR Workshop Proceedings.* 2025. Vol. 4042. P. 193–202. DOI: https://doi.org/10.5281/zenodo.19130829. ISSN 1613-0073

5. Гнатюк В. О, Гамрецький Р. М. Комплексна модель оцінки якості програмного забезпечення в інформаційно-комунікаційних системах з урахуванням динамічних параметрів. *Наукоємні технології*. 2026. №1(69), с. 109-17, DOI: https://doi.org/10.18372/2310-5461.69.20951.

Матеріали доповідей на конференціях, які засвідчують апробацію результатів дисертації

6. Гамрецький Р. Методи та моделі оцінки якості програмного забезпечення в інформаційно-комунікаційних системах. *Політ. Сучасні проблеми науки* : зб. тез доп. Міжнар. наук.-практ. конф. здобувачів вищої освіти і молодих учених, м. Київ, 4–7 квіт. 2023 р. Київ, 2023. С. 8–9.

7. Гамрецький Р. Якість програмного забезпечення в телекомунікаційних системах. *Політ. Сучасні проблеми науки* : зб. тез доп. Міжнар. наук.-практ. конф. здобувачів вищої освіти і молодих учених, м. Київ, 4–7 квіт. 2023 р. Київ, 2023. С. 31–32.

8. Гамрецький Р. М., Гнатюк В. О. Вплив якості програмного забезпечення на функціонування інформаційно-комунікаційних систем. *ABIA-2023* : зб. тез доп. XVI Міжнар. наук.-техн. конф., м. Київ, 18–20 квіт. 2023 р. Київ, 2023. С. 7.37–7.39.

9. Гамрецький Р., Зандер К. Аналіз метрик кібербезпеки для оцінювання якості програмного забезпечення в інформаційно-комунікаційних системах. *ITSec* : зб. тез доп. Міжнар. наук.-техн. конф., м. Ужгород, 2–4 трав. 2023 р. Ужгород, 2023. С. 60–62.

10. Гамрецький Р., Гнатюк В. Роль якості програмного забезпечення у резильєнтності інформаційно-комунікаційних систем. *Живучість та резильєнтність критичної інфраструктури – 2023* : зб. матеріалів Міжнар. наук.-практ. конф., м. Київ, 19 жовт. 2023 р. Київ : ІПМЕ ім. Г. Є. Пухова НАН України, 2023. С. 104–105.

11. Гамрецький Р., Гнатюк В. Статичний аналіз коду програмного забезпечення в інформаційно-комунікаційних системах. *Інформаційна безпека та інформаційні технології* : зб. тез доп. VI Всеукр. наук.-практ. конф. молодих учених, студентів і курсантів, м. Львів, 30 листоп. 2023 р. Львів : ЛДУ БЖД, 2023. С. 258–260.

12. Hamretskyi R., Gnatyuk V. Wielokryterialna ocena jakości oprogramowania w systemach informatycznych oraz komunikacyjnych zgodnie z modelem SQuaRE. *Przetwarzanie, transmisja i bezpieczeństwo informacji* : zb. mat. Bielsko-Biała : Uniwersytet Bielsko-Bialski, 2023. S. 55–62. ISBN 978-83-67652-12-4. DOI: https://doi.org/10.53052/9788367652124.06.

13. Гамрецький Р., Гнатюк В. Аналіз метрик кібербезпеки для оцінки якості програмного забезпечення. *Problems of Scientific, Technical and Legal Support for Cybersecurity in the Modern World* : monograph / eds. S. Semenov, M.

Muchacki. Krakow : Wydawnictwo Naukowe UKEN, 2024. C. 126–136. ISBN 978-86-68020-86-1.

14. Гамрецький Р. Програмне забезпечення інформаційно-комунікаційних систем. *Політ. Сучасні проблеми науки. Аеронавігація. Електроніка. Телекомунікації* : тези доп. XXIV Міжнар. наук.-практ. конф. здобувачів вищої освіти і молодих учених. Київ : НАУ, 2024. С. 23–24.

15. Гамрецький Р., Гнатюк В. Аналіз методів оцінки кібербезпеки програмного забезпечення. *ITSec: Безпека інформаційних технологій* : матеріали XIII Міжнар. наук.-техн. конф., м. Львів, 9–11 трав. 2024 р. Львів : ЛНУ ім. І. Франка, 2024. С. 73–74.

16. Hamretskyi R. M., Zander K. Y., Gnatyuk V. O. Analysis of methods for software quality assessment in aviation information and communication systems. *Proceedings of the Eleventh World Congress "Aviation in the XXI Century" – Safety in Aviation and Space Technologies*, Kyiv, September 25–27, 2024. Kyiv : National Aviation University, 2024. P. 2.1.14–2.1.16.

17. Hamretskyi R., Gnatyuk V. Methods and models for software quality assessment in information and communication systems. *Proceedings of the 2024 IEEE 7th International Conference on Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Development (APUAVD)*, Kyiv, Ukraine, October 22–24, 2024. Kyiv : IEEE, 2024. P. 62–67. ISBN 979-8-3315-3413-4. DOI: https://doi.org/10.1109/APUAVD64488.2024.10765910.

18. Гамрецький Р., Гнатюк В. Аналіз методів та моделей оцінки якості програмного забезпечення в інформаційно-комунікаційних системах. *Політ. Сучасні проблеми науки. Аеронавігація. Електроніка. Телекомунікації* : тези доп. XXV Міжнар. наук.-практ. конф. здобувачів вищої освіти і молодих учених, м. Київ, 1–4 квіт. 2025 р. Київ : Державний університет "Київський авіаційний інститут", 2025. С. 23–24.

19. Гамрецький Р., Гнатюк В. Особливості оцінки якості програмного забезпечення ядра 5G. *Проблеми експлуатації та захисту інформаційно-комунікаційних систем* : тези наук.-практ. конф., м. Київ, 4–6 черв. 2025 р. Київ

: Вид-во Державного університету “Київський авіаційний інститут”, 2025. С. 18–19.

20. Gnatyuk V., Gorbachov I., Hamretskyi R. Dynamic management method of network slices in 5G for improving QoS in VoIP. *2025 IEEE 8th International Conference on Methods and Systems of Navigation and Motion Control (MSNMC)*, Kyiv, Ukraine, 2025. P. 1–4. DOI: https://doi.org/10.1109/MSNMC61130.2025.11399739.

21. Гнатюк В. О., Гамрецький Р. Метод оцінки якості програмного забезпечення для захисту інформації у комп’ютерних мережах. *Інформаційна безпека та інформаційні технології* : зб. тез доп. VII Всеукр. наук.-практ. конф., м. Львів, 27 листоп. 2025 р. Львів : ЛДУ БЖД, 2025. С. 300–302.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ 18
ВСТУП 20
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ МЕТОДІВ, МОДЕЛЕЙ І МЕТРИЧНИХ ПІДХОДІВ ДО ОЦІНКИ ЯКОСТІ ПЗ В ІКС 27
1.1 Особливості розробки та впровадження ПЗ в ІКС 27
1.2 Процеси та стандарти оцінювання якості ПЗ 29
1.3 Аналіз існуючих методологій оцінки якості ПЗ 34
1.4 Аналіз метрик якості ПЗ 39
1.5 Аналіз моделей і методів оцінки якості ПЗ в ІКС 42
1.6 Постановка задач дисертаційного дослідження 47
Висновки до першого розділу 51
РОЗДІЛ 2. СТАТИЧНІ ТА ДИНАМІЧНІ МЕТРИКИ ОЦІНКИ ЯКОСТІ ПЗ В ІКС 54
2.1 Статичні метрики якості ПЗ 55
2.2 Динамічні метрики якості ПЗ 58
2.3 Взаємозв’язок статичних і динамічних метрик 61
2.4 Формування набору метрик для оцінки якості ПЗ в ІКС 64
2.5 Методичні аспекти нормалізації, зважування та інтерпретації метрик 73
2.6 Особливості використання метричного апарату для різних класів ІКС 77
Висновки до другого розділу 81
РОЗДІЛ 3. МОДЕЛЬ ТА МЕТОД ОЦІНЮВАННЯ ЯКОСТІ ПЗ В ІКС НА ОСНОВІ СТАТИЧНИХ І ДИНАМІЧНИХ МЕТРИК 83
3.1 Вимоги до моделі та методу оцінки якості ПЗ в ІКС 83
3.2 Комплексна модель оцінки якості ПЗ в ІКС 87
3.2.1 Загальний підхід до моделювання 89
3.2.2 Формалізація статичних метрик 90
3.2.3 Формалізація динамічних метрик 91
3.2.4 Загальний інтегральний індекс 93

3.2.5 Практичний приклад розрахунку інтегральної оцінки якості ПЗ 94
3.3 Доменний метод оцінки якості ПЗ ядра 5G 96
3.3.1 Математичний опис методу 99
3.4 Практичні аспекти інтеграції моделі та методу у процеси забезпечення якості ПЗ 108
Висновки до третього розділу 111
РОЗДІЛ 4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ПЕРЕВІРКА КОМПЛЕКСНОЇ МОДЕЛІ ТА ДОМЕННОГО МЕТОДУ ОЦІНКИ ЯКОСТІ ПЗ В ІКС 113
4.1 Опис об’єктів експериментального дослідження 114
4.2 Методика проведення експериментів 117
4.2.1 Методика перевірки доменного методу оцінки якості ПЗ ядра 5G .. 118
4.2.2 Методика перевірки комплексної моделі оцінки якості ПЗ в ІКС ... 122
4.3 Експериментальна перевірка методу оцінки якості ПЗ ядра 5G 124
4.4 Експериментальна перевірка комплексної моделі оцінки якості ПЗ в ІКС 132
4.5 Обговорення результатів та практичні рекомендації щодо застосування 136
4.6 Практична схема впровадження результатів дослідження 137
4.7 Обмеження дослідження та напрями подальшої верифікації результатів 139
4.8 Практичні рекомендації щодо використання результатів для експлуатаційного контролю якості 143
4.9 Узагальнення прикладних наслідків експериментальної валідації 144
Висновки до четвертого розділу 145
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ 147
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ 150
СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ 160
ДОДАТКИ 160

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

ІКС – інформаційно-комунікаційні системи

ПЗ – програмне забезпечення

3GPP – Проєкт партнерства третього покоління (3rd Generation Partnership Project)

5G – мобільна мережа п’ятого покоління (Fifth Generation Mobile Network)

AMF – функція керування доступом і мобільністю (Access and Mobility Management Function)

API – інтерфейс програмування застосунків (Application Programming Interface)

AUSF – функція сервера автентифікації (Authentication Server Function)

CI/CD – безперервна інтеграція та безперервне розгортання (Continuous Integration / Continuous Deployment)

CMMI – інтегрована модель зрілості процесів (Capability Maturity Model Integration)

FURPS / FURPS+ – модель атрибутів якості Functionality, Usability, Reliability, Performance, Supportability та її розширення

GQM – підхід «ціль–питання–метрика» (Goal–Question–Metric)

HTTP – протокол передавання гіпертексту (Hypertext Transfer Protocol)

ICMP – протокол керувальних повідомлень Інтернету (Internet Control Message Protocol)

IoT – Інтернет речей (Internet of Things)

ISO/IEC – міжнародні стандарти ISO та IEC (International Organization for Standardization / International Electrotechnical Commission)

MCDM – багатокритеріальне прийняття рішень (Multi-Criteria Decision Making)

MQTT – протокол обміну повідомленнями (Message Queuing Telemetry Transport)

MTBF – середній час між відмовами (Mean Time Between Failures)

MTTR – середній час відновлення (Mean Time To Recovery)

NF – мережева функція (Network Function)

NFV – віртуалізація мережевих функцій (Network Functions Virtualization)

NRF – функція репозиторію мережевих функцій (Network Repository Function)

NSSF – функція вибору мережевого зрізу (Network Slice Selection Function)

PCF – функція політик керування (Policy Control Function)

PDU – блок даних протоколу (Protocol Data Unit)

QoE – якість сприйняття користувачем (Quality of Experience)

QoS – якість обслуговування (Quality of Service)

RESTCONF – протокол керування конфігурацією через REST-подібний інтерфейс (RESTCONF Protocol)

RTT – час двостороннього проходження пакета (Round-Trip Time)

RPS – кількість запитів за секунду (Requests Per Second)

SBA – сервіс-орієнтована архітектура (Service-Based Architecture)

SDN – програмно-конфігурована мережа (Software-Defined Networking)

SLA – угода про рівень обслуговування (Service Level Agreement)

SMF – функція керування сеансами (Session Management Function)

SQuaRE – вимоги та оцінювання якості систем і програмного забезпечення (Systems and Software Quality Requirements and Evaluation)

TCP – протокол керування передаванням (Transmission Control Protocol)

TQM – загальне управління якістю (Total Quality Management)

TUN – віртуальний мережевий тунельний інтерфейс (network tunnel interface)

UDM – уніфіковане керування даними (Unified Data Management)

UDR – уніфіковане сховище даних (Unified Data Repository)

UE – абонентський пристрій (User Equipment)

UERANSIM – емулятор UE та RAN для 5G (UE and RAN Simulator)

UPF – функція площини користувача (User Plane Function)

VM – віртуальна машина (Virtual Machine)

VoIP – передавання голосу через IP-протокол (Voice over Internet Protocol).

ВСТУП

Актуальність теми. Інформаційно-комунікаційні системи (ІКС) є основою сучасної цифрової інфраструктури та забезпечують обмін даними, керування сервісами, інтеграцію інформаційних ресурсів і підтримку критичних процесів у різних галузях. Програмне забезпечення (ПЗ) виступає ключовим компонентом ІКС, а його якість безпосередньо визначає надійність, безпеку, ефективність функціонування, масштабованість і стійкість систем у процесі експлуатації. Для ІКС характерні розподілені архітектури, мікросервісні підходи, активне використання віртуалізації та хмарних інструментів, інтеграція з SDN/IoT-компонентами, а також робота в умовах змінних профілів навантаження та мережевих впливів (затримки, втрати, обмеження пропускної здатності). У таких умовах оцінювання якості ПЗ повинно враховувати не лише властивості програмного продукту як артефакту розробки, а й поведінку системи під час виконання та експлуатації.

Традиційні підходи до оцінювання якості ПЗ (зокрема моделі та стандартизовані рамки якості, процесні та продуктові методології) формують важливу методологічну основу, однак у багатьох випадках вони або описують характеристики якості без достатньо формалізованого механізму інтеграції різнорідних показників, або зосереджуються на організаційно-процесних аспектах управління якістю. Для сучасних ІКС критично важливо поєднувати статичні характеристики (структурні та продуктні властивості ПЗ, що визначають супроводжуваність, модульність, відповідність вимогам, готовність до розгортання в гетерогенних середовищах) із динамічними характеристиками (показники поведінки під час виконання, що відображають здатність системи виконувати функції в умовах навантаження та мережевих впливів). Саме така інтеграція забезпечує можливість отримувати порівнювані інтегральні оцінки якості, аналізувати деградацію характеристик і підтримувати прийняття рішень щодо оптимізації, масштабування або модернізації компонентів ІКС.

Отже, актуальність теми дисертаційного дослідження зумовлена потребою розвитку методів і моделей оцінювання якості ПЗ в ІКС шляхом: систематизації існуючих підходів і визначення їх обмежень у контексті експлуатаційної динаміки; формалізації узгодженого набору статичних і динамічних метрик; побудови інтегральної моделі та методу оцінювання, придатних до автоматизації; експериментальної перевірки працездатності підходу в умовах, наближених до реальної експлуатації ІКС.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційну роботу виконано відповідно до наукового напряму кафедри телекомунікаційних та радіоелектронних систем Національного університету «Київський авіаційний інститут», пов'язаного з розробленням, дослідженням і вдосконаленням методів, моделей та засобів забезпечення якості, надійності, безпеки й ефективності функціонування ПЗ в сучасних ІКС, зокрема науково-дослідної роботи за темою «Методи підвищення експлуатаційної ефективності телекомунікаційних та радіоелектронних систем об'єктів критично важливої інфраструктури України», шифр 425-ДБ22 у період 2022-2023 років, номер державної реєстрації № 0122U001804.

Тематика дисертаційного дослідження відповідає планам наукової та навчально-методичної роботи кафедри і пов'язана з актуальними завданнями підвищення якості ПЗ в телекомунікаційних, розподілених, хмарних та сервіс-орієнтованих ІКС, зокрема в середовищах 5G, IoT, SDN/NFV та інших сучасних ІКС. Окремі результати роботи впроваджено у навчальний процес кафедри та використано в матеріалах, що стосуються аналізу якості ПЗ мережевих і сервісних компонентів ІКС.

Мета і завдання дослідження. Мета дисертаційного дослідження полягає у підвищенні точності, об'єктивності та практичної придатності оцінювання якості ПЗ в ІКС шляхом розроблення комплексної моделі та доменно-орієнтованого методу, що враховують взаємозв'язок між статичними характеристиками програмного продукту та його динамічними операційними показниками в умовах змінного навантаження.

Для досягнення поставленої мети необхідно розв’язати такі завдання:

1. Проаналізувати сучасний стан проблеми оцінювання якості ПЗ в ІКС, систематизувати існуючі стандарти, методології, моделі та метричні підходи, а також визначити їх обмеження щодо застосування в розподілених, віртуалізованих і сервісно-орієнтованих середовищах.

2. Сформувати узгоджену систему статичних і динамічних метрик оцінювання якості ПЗ в ІКС, яка враховує продуктові характеристики ПЗ, експлуатаційні параметри його функціонування та доменно-специфічні вимоги сучасних ІКС.

3. Обґрунтувати методичні засади нормалізації, зважування, агрегування, адаптивного коригування вагових коефіцієнтів та інтерпретації різнорідних показників якості ПЗ, необхідні для отримання порівнюваної та відтворюваної оцінки в умовах різних сценаріїв функціонування ІКС.

4. Розробити комплексну модель оцінювання якості ПЗ в ІКС на основі поєднання статичних і динамічних метрик, яка забезпечує можливість інтегрального подання результатів оцінювання та врахування впливу експлуатаційного контексту.

5. Розробити доменно-орієнтований метод оцінювання якості ПЗ ядра 5G, адаптований до сервісно-орієнтованої архітектури, особливостей функціонування мережевих функцій та вимог сучасних телекомунікаційних систем.

6. Провести експериментальну перевірку запропонованих моделі та методу в середовищах, наближених до умов експлуатації ІКС, із використанням керованого навантаження, емуляції мережевих параметрів та інструментального моніторингу показників функціонування.

7. Формалізувати та експериментально перевірити здатність запропонованого доменно-орієнтованого методу забезпечувати покриття контрольних вимог до доменних метрик ПЗ ядра 5G шляхом зіставлення фактичних показників площини користувача (user-plane) із контрольними межами, визначеними для затримки, джитера та втрати пакетів, а також

встановити відповідність отриманих результатів допустимим параметрам функціонування у визначених сценаріях навантаження.

8. Оцінити практичну придатність отриманих результатів для підтримки прийняття рішень щодо контролю якості, виявлення деградації, порівняння конфігурацій, оптимізації програмних компонентів та інтеграції процедур оцінювання якості в процеси розроблення, тестування й експлуатаційного моніторингу ПЗ в ІКС.

Об’єктом дослідження є процеси оцінювання та контролю якості ПЗ в сучасних ІКС.

Предметом дослідження є методи та моделі оцінювання якості ПЗ ІКС, що базуються на інтеграції міжнародних стандартів із доменно-специфічними динамічними метриками функціонування.

Методи дослідження: у дисертації використано методи системного аналізу та порівняння для огляду існуючих підходів; методи формалізації та математичного моделювання для визначення метрик і побудови інтегральної оцінки; підходи багатокритеріального оцінювання для агрегування показників якості; експериментальні методи для валідації запропонованих рішень у середовищі, наближеному до умов експлуатації ІКС, із застосуванням керованої емуляції мережевих характеристик та інструментального моніторингу.

Наукова новизна отриманих результатів:

1. Вперше запропоновано доменно-орієнтований метод комплексної оцінки якості ПЗ ядра 5G-мереж, який, на відміну від існуючих, ґрунтується на поєднанні базових метрик стандарту ISO/IEC 25010 із доменно-специфічними показниками сучасних телекомунікаційних систем (затримка сигналізації, масштабованість, енергоефективність на сесію). Це дозволяє здійснювати багатовимірну оцінку програмних компонентів (AMF, SMF, UPF) з урахуванням сервісного, функціонального та інфраструктурного рівнів.

2. Удосконалено метод розрахунку інтегрального показника якості ПЗ шляхом запровадження алгоритму адаптивного коригування вагових коефіцієнтів. На відміну від статичного зважування, такий підхід забезпечує

автоматичний перерахунок значущості динамічної складової при виникненні мережевих аномалій або критичних стрибків навантаження, що підвищує точність і швидкість виявлення деградації сервісів.

3. Вперше розроблено комплексну багаторівневу модель інтегральної оцінки якості ПЗ ІКС, яка, на відміну від традиційних підходів, поєднує статичні характеристики програмного продукту з динамічними операційними метриками (пропускна здатність, втрати пакетів, час реакції). Використання цієї моделі дозволяє кількісно визначати розрив між формально задекларованою якістю ПЗ та його фактичною ефективністю в умовах розподілених мереж під навантаженням.

4. Дістали подальшого розвитку критеріальні моделі оцінювання якості ПЗ для сучасних ІКС. Завдяки розробленому багатофакторному підходу формалізовано інтеграцію специфічних показників кібербезпеки, енергоспоживання та стійкості мікросервісів у класичні референтні моделі ISO/IEC 25010, CMMI та FURPS+, що створює теоретичне підґрунтя для їх застосування в середовищах IoT, SDN та хмарних обчислень.

Практичне значення одержаних результатів. Отримані результати можуть бути використані під час розроблення, впровадження та експлуатації ПЗ в ІКС з метою підвищення точності, об’єктивності та практичної придатності оцінювання його якості. Практичне значення дисертаційної роботи полягає у можливості застосування запропонованих моделі та методу для порівняння альтернативних реалізацій і конфігурацій програмних компонентів ІКС на основі узгоджених інтегральних оцінок якості, підтримки обґрунтованого прийняття рішень щодо модернізації, масштабування та оптимізації програмних компонентів з урахуванням реальних умов експлуатації та вимог SLA, організації моніторингу і контролю якості в процесі функціонування систем на основі динамічних метрик, аналізу деградації характеристик у часі та раннього виявлення ризиків порушення працездатності, а також інтеграції процедур оцінювання якості з процесами безперервного удосконалення ПЗ, зокрема в межах CI/CD-пайплайнів і систем експлуатаційного моніторингу.

Окремі результати дисертаційної роботи впроваджено у навчальний процес кафедри телекомунікаційних та радіоелектронних систем, зокрема під час підготовки навчально-методичних матеріалів щодо аналізу якості ПЗ мережевих і сервісних компонентів ІКС, а також у практичну діяльність ТОВ «СМАРТ ПАВЕР», що підтверджено відповідними актами впровадження.

Особистий внесок здобувача. Усі наукові положення, методи, моделі та результати, що виносяться на захист, отримані автором самостійно. У роботах, виконаних у співавторстві, автору належать постановка задач, розробка методів та моделей, проведення моделювання та інтерпретація отриманих результатів.

Апробація результатів. Основні положення та результати, отримані автором доповідалися на науково-практичних та науково-технічних конференціях різного рівня: “Політ. Сучасні проблеми науки” (Київ, 2023), “ABIA-2023” (Київ, 2023), “ITSEC” (Ужгород, 2023), “Живучість та резильєнтність критичної інфраструктури – 2023” (Київ, 2023), “Інформаційна безпека та інформаційні технології” (Львів, 2023), “Проблеми науково-технічного та правового забезпечення кібербезпеки у сучасному світі” (Краків, 2024), “Політ. Сучасні проблеми науки” (Київ, 2024), “ITSEC” (Львів, 2024), “Aviation in the XXI Century” – “Safety in Aviation and Space Technologies” (Київ, 2024), 2024 IEEE 7th International Conference on Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Development (APUAVD) (Київ, 2024), “Інформаційна безпека та інформаційні технології” (Львів, 2024), “Політ. Сучасні проблеми науки” (Київ, 2025), “Проблеми експлуатації та захисту інформаційно-комунікаційних систем” (Київ, 2025), Fourth International Conference on Cyber Hygiene & Conflict Management in Global Information Networks (Київ, 2025), 2025 IEEE 8th International Conference on Methods and Systems of Navigation and Motion Control (MSNMC) (Київ, 2025), “Інформаційна безпека та інформаційні технології” (Львів, 2025).

Публікації. Основні результати дисертаційної роботи опубліковано в 21 науковій праці, серед яких 3 статті, які входять до переліку фахових наукових

видань МОН України, 2 статті, що проіндексовані в наукометричній базі Scopus, 16 матеріалів наукових конференцій.

Обсяг і структура дисертації. Дисертаційна робота складається з анотації, змісту, переліку умовних позначень, вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг роботи становить 186 сторінок, з них основна частина – 129 сторінок. Робота містить 23 рисунки, 32 таблиці та 7 додатків. Список використаних джерел налічує 80 найменувань.

РОЗДІЛ 1
АНАЛІЗ МЕТОДІВ, МОДЕЛЕЙ І МЕТРИЧНИХ ПІДХОДІВ ДО ОЦІНКИ ЯКОСТІ ПЗ В ІКС

У розділі здійснено аналіз методів, моделей і метричних підходів до оцінювання якості ПЗ в ІКС. Розглянуто особливості розроблення та впровадження ПЗ в умовах розподілених архітектур, мережевої взаємодії, віртуалізації та змінних профілів навантаження; проаналізовано нормативну основу оцінювання якості в межах сімейства стандартів SQuaRE; узагальнено сучасні методології, моделі та метрики оцінювання якості ПЗ в ІКС. На цій основі визначено обмеження існуючих підходів і сформовано передумови для подальшого формування узгодженої системи статичних і динамічних метрик.

1.1 Особливості розробки та впровадження ПЗ в ІКС

ІКС є складними програмно-апаратними утвореннями, у яких ПЗ виконує не лише прикладні функції, а й забезпечує управління ресурсами, маршрутизацію потоків даних, координацію сервісів та інтеграцію компонентів різного рівня. На відміну від автономних програмних продуктів, ПЗ в ІКС функціонує в умовах постійної взаємодії з мережею, віртуалізованою інфраструктурою, зовнішніми API та гетерогенними апаратними платформами, а отже його якість проявляється як на рівні внутрішніх характеристик програмного продукту, так і на рівні фактичної поведінки під час експлуатації [1–7].

Сучасні ІКС розвиваються в напрямі сервісно-орієнтованих і розподілених архітектур, для яких характерні програмно-керовані мережі, віртуалізація мережевих функцій, хмарні моделі розгортання та модульна взаємодія компонентів. Зокрема, 5G Core базується на сервісно-орієнтованій архітектурі, у межах якої мережеві функції взаємодіють через стандартизовані сервісні інтерфейси, що забезпечує модульність і повторне використання

функціональності [4; 8–10]. Водночас NFV передбачає реалізацію мережевих функцій у програмному вигляді на стандартній обчислювальній інфраструктурі, а SDN орієнтований на програмне керування мережевою поведінкою та відокремлення логіки керування від площини передавання даних [5–6; 11].

У сукупності ці особливості зумовлюють залежність якості ПЗ від режиму розгортання, способу оркестрації, мережевих умов і динаміки навантаження. Для ПЗ в ІКС істотне значення має те, що етапи проєктування, розроблення, розгортання та експлуатації утворюють не ізольовану послідовність, а взаємопов’язаний цикл. Зміна конфігурації, масштабування сервісів, міграція компонентів між вузлами інфраструктури, оновлення залежностей або зміна мережевого профілю можуть безпосередньо впливати на показники затримки, пропускної здатності, стійкості до відмов і доступності сервісу. Це означає, що якість ПЗ в ІКС доцільно розглядати як поєднання продуктової якості та якості функціонування в конкретному середовищі використання [1; 4–5; 7].

Особливої уваги потребує взаємозв’язок між архітектурними рішеннями та експлуатаційними проявами якості. Висока модульність, керованість залежностей, адаптивність до середовища розгортання та належна організація механізмів безпеки формують передумови досягнення належної якості на етапі виконання. Натомість надмірне зчеплення між компонентами, складність конфігурацій, слабка переносимість або недостатній контроль доступу підвищують ризик деградації сервісу в умовах масштабування, перевантаження або зміни інфраструктурного контексту. Унаслідок цього оцінювання якості ПЗ в ІКС не може обмежуватися лише аналізом реалізації як програмного продукту, а має враховувати реальні умови функціонування [1; 5–6].

Для ІКС також характерна багаторівнева критичність. На сервісному рівні якість визначається здатністю системи забезпечувати необхідні часові та функціональні характеристики; на інфраструктурному – залежить від доступності ресурсів, мережевої топології та стабільності середовища розгортання; на безпековому – від здатності підтримувати належний рівень контролю доступу, цілісності та стійкості до зовнішніх впливів. Тому система

оцінювання якості ПЗ в ІКС повинна бути чутливою як до структурних характеристик програмного продукту, так і до динамічних показників його функціонування [1; 4–6]. Ключові особливості ІКС, що безпосередньо впливають на специфіку оцінювання якості ПЗ, узагальнено на рисунку 1.1.



Рис. 1.1. Особливості ІКС, що визначають специфіку оцінювання якості ПЗ

Отже, особливості розроблення та впровадження ПЗ в ІКС обумовлюють необхідність переходу від ізольованого використання окремих моделей або локальних метрик до комплексного підходу, у якому статичні показники відображають продуктові передумови досягнення якості, а динамічні – її фактичний прояв у процесі функціонування системи. Саме така логіка є методичною основою подальшого формування системи метрик оцінювання якості ПЗ в ІКС.

1.2 Процеси та стандарти оцінювання якості ПЗ

Оцінювання якості ПЗ є систематизованим процесом встановлення того, наскільки програмний продукт або програмна система відповідає визначеним вимогам, очікуваним сценаріям використання та умовам експлуатації. У

міжнародній практиці найбільш послідовне нормативне підґрунтя такого оцінювання сформовано в межах сімейства стандартів Systems and Software Quality Requirements and Evaluation (SQuaRE), яке забезпечує узгоджений підхід до опису характеристик якості, вибору метрик і подальшої інтерпретації результатів [1–3; 12–13].

Стандарт ISO/IEC 25010:2023 визначає модель якості продукту, застосовну до ІКТ-продуктів і програмних продуктів, та встановлює систему характеристик і підхарактеристик, що використовуються як референтна основа для специфікації, вимірювання й оцінювання якості. До таких характеристик належать, зокрема, функціональна придатність, ефективність функціонування, сумісність, зручність використання, надійність, безпека, супроводжуваність і переносимість [1]. Принциповим є те, що ISO/IEC 25010 задає саме структурно-понятійний каркас оцінювання, але не встановлює універсального алгоритму інтегрування різнорідних показників у єдину підсумкову оцінку.

Подальша деталізація SQuaRE здійснюється через стандарти ISO/IEC 25022 та ISO/IEC 25023. ISO/IEC 25022:2016 містить рекомендований, але не вичерпний набір показників якості використання, а саме мір якості у використанні, що застосовуються разом із моделлю ISO/IEC 25010 для оцінювання результативності, ефективності та інших аспектів взаємодії із системою [2]. ISO/IEC 25023:2016 визначає показники якості для кількісного оцінювання якості програмного продукту та системи в термінах характеристик і підхарактеристик, установлених ISO/IEC 25010, і призначений для сумісного застосування з цією моделлю [3]. Таким чином, сімейство SQuaRE забезпечує зв’язок між моделлю якості та метричним апаратом її кількісного опису.

З методичної точки зору процес оцінювання якості ПЗ доцільно розглядати як послідовність взаємопов’язаних етапів: визначення цілей оцінювання; вибір референтної моделі якості; формування релевантного набору метрик; збирання даних; нормалізація та агрегування показників; інтерпретація результатів; формування рекомендацій щодо вдосконалення ПЗ [1–3; 12–13]. Така послідовність є спільною для більшості сучасних підходів, однак на практиці

суттєво різниться за ступенем формалізації, рівнем автоматизації та глибиною врахування експлуатаційного контексту. Узагальнену послідовність такого процесу подано на рисунку 1.2.

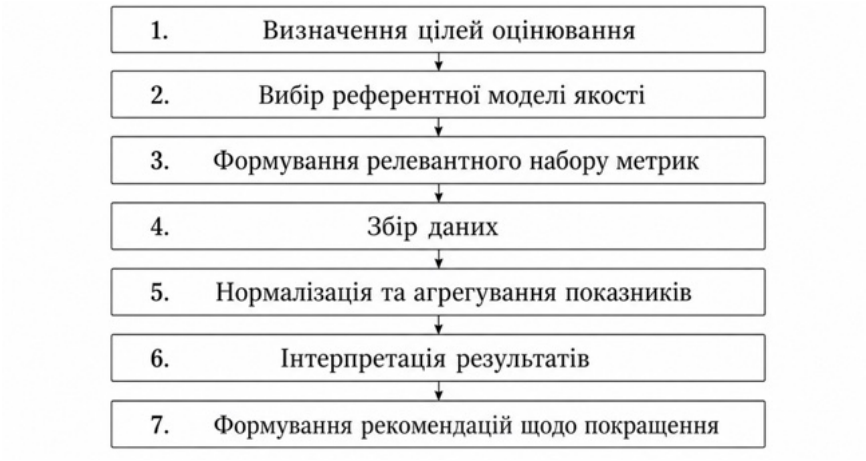

Рис. 1.2. Узагальнений процес оцінювання якості ПЗ

Подана на рисунку 1.2 послідовність відображає загальну логіку сучасних підходів до оцінювання якості ПЗ, однак для ІКС вона потребує конкретизації щодо складу метрик, способів збирання експлуатаційних даних, процедур нормалізації та механізмів інтегрування різнорідних показників у єдину систему оцінювання. Саме ця обставина зумовлює необхідність подальшого формування узгодженого метричного апарату для ІКС.

Для ІКС особливого значення набуває розмежування між статичною та динамічною оцінкою. Статична оцінка охоплює аналіз вимог, архітектури, конфігурації, структури коду та документації без обов’язкового виконання системи. Динамічна оцінка виконується в процесі тестування або експлуатації та дає змогу спостерігати поведінку ПЗ в умовах реального або наближеного до реального функціонування. Саме динамічна складова дозволяє виявити деградацію сервісної якості під впливом навантаження, затримок, втрат пакетів, відмов окремих компонентів або змін параметрів інфраструктури, що є принципово важливим для ІКС [4–5].

У цьому контексті стандарти SQuaRE доцільно розглядати не як завершене рішення для оцінювання якості ПЗ в ІКС, а як узгоджену нормативну основу, на якій може бути побудовано доменно-релевантну систему оцінювання. Їх

сильною стороною є повнота понятійної моделі та узгодженість метричного підходу, однак для систем із розподіленою архітектурою, сервісною взаємодією та змінним навантаженням вони потребують доповнення експлуатаційними показниками, які безпосередньо відображають поведінку сервісу [1–3].

Для ІКС важливо також розмежовувати нормативну повноту моделі та її операційну придатність. Нормативна повнота означає, що модель охоплює необхідні характеристики й підхарактеристики якості. Операційна придатність означає, що для релевантних характеристик визначено реальні джерела даних, способи вимірювання, правила нормалізації та механізми інтерпретації результатів. У середовищах, де якість залежить від параметрів мережі, віртуалізації та сервісної композиції, саме операційна придатність є критичною умовою побудови відтворюваної системи оцінювання [1–3; 5–7].

Отже, сучасна система оцінювання якості ПЗ в ІКС повинна поєднувати нормативно визначену структуру характеристик якості із системою статичних і динамічних метрик, що враховують особливості реального функціонування програмних компонентів. Такий висновок безпосередньо обґрунтовує доцільність подальшого формування узгодженого метричного апарату оцінювання, який може бути використаний як методична основа для побудови методів та моделей.

З метою систематизації зазначених положень у таблиці 1.1 наведено узагальнену характеристику функціонального призначення основних стандартів сімейства SQuaRE у системі оцінювання якості ПЗ в ІКС.

Таблиця 1.1

Функціональне призначення основних стандартів сімейства SQuaRE у системі оцінювання якості ПЗ в ІКС

Стандарт	Основний рівень застосування	Що саме забезпечує	Обмеження без додаткової адаптації до ІКС
ISO/IEC 25010	модель якості	задає структуру характеристик і підхарактеристик якості	не визначає завершеної процедури інтегрального оцінювання

Стандарт	Основний рівень застосування	Що саме забезпечує	Обмеження без додаткової адаптації до ІКС
ISO/IEC 25022	якість у використанні	дозволяє оцінювати результативність і ефективність взаємодії з системою	потребує прив'язки до конкретних сценаріїв використання
ISO/IEC 25023	якість програмного продукту	надає метричну основу для продуктово-орієнтованих характеристик	не охоплює повною мірою доменно-специфічні динамічні параметри ІКС
SQuaRE як сімейство	узгодження моделі й вимірювання	створює спільну термінологічну та методичну базу	для ІКС потребує доповнення експлуатаційними та мережевими метриками

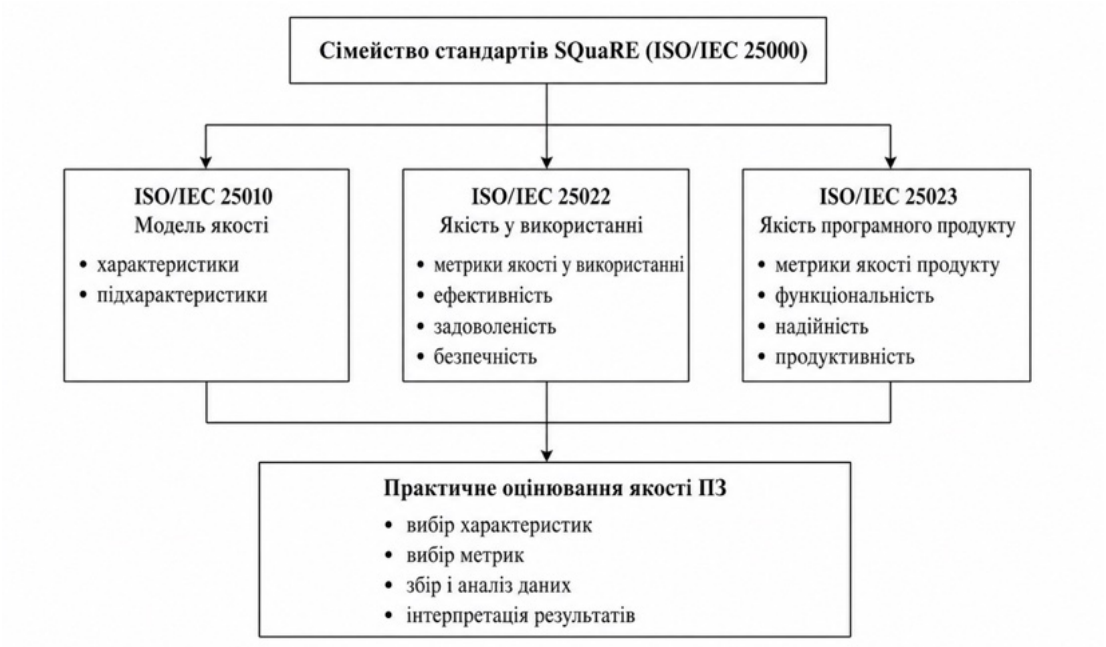

Рис. 1.3. Логіка сімейства SQuaRE для формування системи оцінювання якості ПЗ

Як показано на рисунку 1.3, стандарти ISO/IEC 25010, ISO/IEC 25022 та ISO/IEC 25023 утворюють узгоджену нормативну основу для формування системи характеристик, метрик і процедур оцінювання якості ПЗ. Водночас для ІКС така основа не є самодостатньою, оскільки потребує доповнення доменно-

специфічними динамічними показниками та формалізованим механізмом інтегрування результатів.

1.3 Аналіз існуючих методологій оцінки якості ПЗ

Існуючі методології оцінювання якості ПЗ відрізняються за об’єктом аналізу, рівнем формалізації, способом добору показників та ступенем придатності до практичного застосування в різних класах програмних систем. У загальному випадку якість ПЗ може розглядатися як сукупність властивостей програмного продукту, результат зрілості процесів розроблення, відповідність визначеним цілям оцінювання або узгоджений результат багатокритеріального аналізу [1–3; 14–17]. Для ІКС це розмежування має принципове значення, оскільки якість ПЗ в ІКС визначається не лише структурними властивостями програмного продукту, а й умовами його функціонування в розподіленому, мережевому, віртуалізованому та сервісно-орієнтованому середовищі [4–7].

Узагальнення наявних підходів дає змогу виділити кілька основних груп методологій оцінювання якості ПЗ: стандартизовані, процесно-орієнтовані, атрибутивні, цільово-метричні та багатокритеріальні. Класифікацію основних підходів до оцінювання якості ПЗ подано на рисунку 1.4.



Рис. 1.4. Класифікація основних підходів до оцінювання якості ПЗ

Подана на рисунку 1.4 класифікація відображає не стільки завершену ієрархію методологій, скільки основні напрями, у межах яких формувалися підходи до оцінювання якості ПЗ. Такий поділ є доцільним для подальшого аналізу, оскільки дозволяє окремо розглянути нормативні моделі якості, процесні підходи до забезпечення якості, класичні факторні моделі, підходи до формування метрик та методи багатокритеріального узагальнення результатів.

До стандартизованих методологій належить насамперед сімейство стандартів SQuaRE, яке формує нормативну основу для опису характеристик і підхарактеристик якості програмного продукту та пов’язує модель якості з відповідними мірами якості [1–3]. Перевагою такого підходу є термінологічна узгодженість, формалізованість структури якості та можливість використання стандарту як спільної основи для побудови системи оцінювання. Водночас стандартизована модель сама по собі не визначає універсального алгоритму інтегрування різнорідних показників у єдину оцінку та не задає повного набору доменно-специфічних метрик для конкретних класів ІКС.

Процесно-орієнтовані підходи розглядають якість ПЗ переважно через зрілість, керованість і повторюваність процесів розроблення та супроводу. Одним із найбільш відомих представників такого напряму є CMMI, який використовується для оцінювання рівня зрілості процесів і здатності організації стабільно досягати визначених цілей якості [18]. Сильна сторона процесно-орієнтованих підходів полягає у формуванні організаційних передумов досягнення якості. Однак вони не забезпечують безпосередньої кількісної оцінки фактичної поведінки конкретного програмного компонента в умовах експлуатації.

Класичні атрибутивні моделі McCall, Boehm і Dromey мають важливе методологічне значення, оскільки сформували основу факторного підходу до опису якості ПЗ [19–21]. У цих моделях якість подається через сукупність характеристик, факторів або атрибутів, які дозволяють пов’язати внутрішні властивості програмного продукту з його зовнішніми проявами. Їх перевага полягає у структурованому поданні якості та можливості розглядати її як

багатовимірну категорію. Водночас такі моделі були сформовані переважно для програмних систем, у яких експлуатаційний контекст не мав такої динамічності, як у сучасних ІКС. Тому вони обмежено враховують вплив мережевої взаємодії, розподіленого розгортання, віртуалізації, сервісної композиції та змінного навантаження.

Цільово-метричний підхід GQM ґрунтується на послідовному переході від цілей оцінювання до питань і далі до конкретних метрик [22]. Його перевага полягає в тому, що набір показників формується не довільно, а відповідно до цілей аналізу. Для задач оцінювання якості ПЗ в ІКС це є важливим, оскільки дозволяє пов’язувати метрики з конкретними сценаріями функціонування системи, вимогами до сервісу, безпеки, продуктивності або надійності. Проте GQM не задає власної нормативної моделі якості та не визначає способу інтегрування різнорідних показників у підсумкову оцінку.

Історично важливим етапом розвитку стандартизованих моделей якості був стандарт ISO/IEC 9126, який заклав основу для структурованого подання характеристик якості програмного продукту [23]. Надалі ця логіка була розвинена в сімействі SQuaRE. Для сучасного дослідження ISO/IEC 9126 доцільно розглядати як попередню нормативну основу, що має методологічне значення, але поступається актуальним стандартам ISO/IEC 25010, ISO/IEC 25022 та ISO/IEC 25023 за повнотою і сучасністю термінологічного апарату.

Багатокритеріальні підходи до оцінювання якості ПЗ, зокрема MCDM-подібні схеми, застосовуються тоді, коли якість неможливо описати одним показником і необхідно враховувати декілька критеріїв різної природи [24–26]. Такі підходи дозволяють виконувати зважування, ранжування, порівняння альтернатив і узагальнення часткових оцінок. Для ІКС це є важливою передумовою, оскільки якість ПЗ в таких системах формується одночасно через продуктові, сервісні, мережеві, інфраструктурні та безпекові характеристики. Водночас багатокритеріальні методи потребують попередньо визначеної системи критеріїв і правил інтерпретації результатів.

Підходи TQM і Six Sigma належать до ширшого напряму управління та забезпечення якості, спрямованого на безперервне вдосконалення процесів, зменшення дефектності, контроль відповідності вимогам і підвищення стабільності результатів [27–29]. Вони можуть бути корисними для організації процесів розроблення й супроводу ПЗ, однак не є самодостатніми моделями оцінювання якості конкретного програмного продукту в ІКС. Їх доцільно розглядати як допоміжні підходи, що підтримують управління якістю, але не замінюють метричну систему оцінювання.

Окремі аспекти проблематики оцінювання якості ПЗ в ІКС висвітлено у працях [14–17; 30–44]. У них розглянуто питання аналізу методів і моделей оцінювання, ролі якості ПЗ у функціонуванні ІКС, а також використання безпекових показників у системі оцінювання. Водночас зазначені праці доцільно розглядати як апробацію окремих аспектів проблематики та підтвердження її актуальності, а не як завершене розв’язання задачі побудови цілісної системи оцінювання якості ПЗ в ІКС.

Узагальнення розглянутих методологій дозволяє виділити низку прогалин, які є критичними саме для оцінювання якості ПЗ в ІКС. Вони систематизовані в таблиці 1.2.

Таблиця 1.2

Методологічні прогалини, критичні для оцінювання якості ПЗ в ІКС

Група підходів	Типова сильна сторона	Що лишається недостатньо опрацьованим для ІКС
Стандартизовані моделі	нормативно визначена структура характеристик якості	відсутність універсальної процедури інтегрування мережевих, сервісних і навантажувальних показників
Процесно-орієнтовані підходи	керованість і зрілість процесів розроблення	оцінка фактичної якості конкретного сервісу або компонента в експлуатації
Атрибутивні класичні моделі	факторний опис продуктових властивостей	недостатнє врахування розподіленого розгортання, сервісної композиції та мережевої взаємодії

Група підходів	Типова сильна сторона	Що лишається недостатньо опрацьованим для ІКС
GQM	цілеспрямоване формування набору метрик	відсутність власної нормативної моделі якості та механізму інтегрального агрегування
MCDM-підходи	можливість зважування, ранжування та порівняння різнорідних критеріїв	потреба в попередньо визначеній системі характеристик і правилах відбору релевантних показників
TQM / Six Sigma	підтримка безперервного вдосконалення процесів	непряма оцінка якості ПЗ, без достатнього врахування експлуатаційної поведінки сервісу

Дані таблиці 1.2 свідчать, що жодна з розглянутих груп підходів окремо не забезпечує повного поєднання нормативно визначеної структури якості, формалізованої системи метрик, урахування експлуатаційної динаміки, доменної адаптації та механізму інтегрального оцінювання. Це не знижує значення наявних методологій, але вказує на необхідність їх узгодженого використання залежно від задачі оцінювання та класу ІКС.

Для підготовки подальшої постановки задач важливо інтерпретувати зазначені прогалини не як заперечення цінності окремих стандартів або методів, а як підставу для їх комбінованого використання в межах єдиної системи оцінювання якості ПЗ в ІКС.

Таким чином, аналіз існуючих методологій оцінювання якості ПЗ показує, що для ІКС недостатньо обмежитися лише нормативною моделлю якості, процесним підходом або окремим набором метрик. Необхідною передумовою подальшого дослідження є встановлення того, наскільки наявні моделі й методи придатні до застосування саме в умовах ІКС, де якість ПЗ залежить від взаємодії продуктових, експлуатаційних, мережевих та безпекових характеристик.

Для ІКС особливого значення набуває не виділення окремої універсальної групи доменно-орієнтованих методологій, а необхідність адаптації наявних моделей і методів до конкретного класу ІКС. Зокрема, для 5G, IoT, SDN/NFV,

хмарних та кіберфізичних середовищ різну значущість можуть мати показники затримки, пропускної здатності, масштабованості, відмовостійкості, безпеки та доступності сервісу. Це свідчить про потребу в подальшому профілюванні системи метрик відповідно до доменного контексту оцінювання.

1.4 Аналіз метрик якості ПЗ

Метрики якості ПЗ є кількісними або якісно формалізованими показниками, за допомогою яких характеристикам моделі якості надається вимірюваний зміст. На відміну від моделі якості, яка визначає систему категорій, метрики дозволяють порівнювати програмні продукти, конфігурації або релізи між собою, відстежувати деградацію властивостей у часі та приймати рішення щодо модернізації, масштабування або оптимізації системи [2–3; 14; 17]. Для ІКС значення метричного апарату є особливо великим, оскільки саме через метрики стає можливим перейти від загального опису якості до її технічно інтерпретованої та відтворюваної оцінки.

У сучасних підходах до забезпечення якості ПЗ метрики розглядаються як засіб кількісного зв’язку між факторами якості та результатами оцінювання, що дозволяє перейти від декларативного опису характеристик до вимірюваних показників [45].

У межах сімейства SQuaRE принциповим є розмежування між характеристикою, підхарактеристикою, метрикою та мірою якості. Характеристика якості визначає широку властивість ПЗ, підхарактеристика конкретизує її зміст, метрика встановлює спосіб вимірювання, а міра якості є числовим результатом застосування відповідної метрики до об’єкта оцінювання [1–3]. Для цього дослідження таке розмежування має методичне значення, оскільки дозволяє уникнути змішування різних рівнів аналізу при побудові системи оцінювання якості ПЗ в ІКС.

У загальному вигляді систему метрик для ІКС доцільно подати як об’єднання двох взаємопов’язаних підмножин:

$$\mathrm{M} = M_s \cup M_d, \tag{1.1}$$

де M_s – множина статичних метрик, а M_d – множина динамічних метрик.

Статичні метрики характеризують внутрішні властивості програмного продукту та визначаються без обов'язкового виконання системи. До них належать показники функціонального покриття, модульності, складності реалізації, керованості доступу, адаптивності до середовища розгортання, супроводжуваності та інших властивостей, які дозволяють оцінити готовність ПЗ до безпечного та керованого функціонування [14–15; 21]. Для ІКС статичні метрики мають прогностичну цінність, оскільки відображають передумови досягнення належної якості ще до початку продуктивної експлуатації.

Динамічні метрики, своєю чергою, відображають якість ПЗ під час виконання та дозволяють оцінити фактичну поведінку системи в умовах реального або наближеного до реального функціонування. Для ІКС до таких показників належать насамперед затримка, пропускна здатність, втрати пакетів, стійкість сервісу, надійність, відновлюваність, масштабованість і чутливість до перевантаження [4–7; 16–17; 69]. Саме динамічні метрики дають змогу виявити деградацію сервісної якості, яка не завжди проявляється на рівні архітектури або структури коду.

Для сучасних ІКС важливо не лише розділити метрики на статичні та динамічні, а й врахувати їх контекстну залежність. Одне й те саме ПЗ може демонструвати різні значення затримки, пропускної здатності або втрати пакетів залежно від конфігурації мережі, типу навантаження, характеристик платформи та режиму розгортання. Унаслідок цього інтегральна оцінка якості в ІКС у загальному випадку визначається не лише множиною метрик, а й контекстом їх застосування:

$$Q = f(M, C), \tag{1.2}$$

де Q – результат оцінювання якості, M – система метрик, C – контекст функціонування, який охоплює тип ІКС, режим навантаження, параметри мережевого середовища та умови розгортання.

Ця залежність має принципове значення для подальшого дослідження, оскільки показує, що сама по собі метрика не є універсально інформативною поза контекстом її вимірювання. Саме тому для ІКС до системи показників висуваються додаткові вимоги: релевантність до задач оцінювання, вимірюваність, інтерпретованість, відтворюваність, чутливість до зміни навантаження й мережевих умов, а також технологічна придатність до автоматизованого збору [14–15; 17].

Особливого значення набуває питання добору мінімально достатнього набору метрик. У багатокритеріальних системах оцінювання надмірно широкий перелік показників не обов’язково підвищує точність висновку, а часто ускладнює інтерпретацію та призводить до дублювання інформації [24–26]. Саме тому для ІКС доцільно використовувати не максимально повний, а узгоджений набір показників, який одночасно охоплює продуктову, сервісну, інфраструктурну та безпекову площини якості [14; 17; 21].

Окремі аспекти формування такого набору метрик розглядалися в роботах [14–17; 21], де апробовано підходи до використання структурних, безпекових і експлуатаційних показників для різних класів ІКС. Разом з тим ці результати слід розглядати як попереднє опрацювання окремих груп показників, а не як остаточно сформовану універсальну систему метрик. З цієї причини питання узгодження статичних і динамічних показників, вибору мінімально достатнього складу метрик та встановлення правил їх подальшої інтеграції зберігає актуальність і потребує окремого системного розгляду в наступному розділі.

Для окремих доменів ІКС система метрик потребує профілювання. У 5G Core особливої ваги набувають затримка сигналізації, масштабованість, відмовостійкість, сумісність із NFV/SDN-інфраструктурою та ефективність використання ресурсів [6–7; 16]. Для систем із підвищеними вимогами до безпеки доцільно посилювати роль метрик контролю доступу, цілісності, стійкості до порушення штатного режиму та здатності підтримувати захищену взаємодію [15]. Це означає, що система метрик для ІКС повинна бути одночасно стандартизованою за логікою побудови й адаптивною за складом показників.

Таким чином, аналіз метрик якості ПЗ підтверджує, що для ІКС доцільно використовувати не ізольований набір окремих показників, а узгоджену систему статичних і динамічних метрик, побудовану на основі стандартизованої моделі якості та доповнену доменно-релевантними експлуатаційними параметрами. Саме такий підхід створює методичну основу для подальшого формування метричного апарату, розглянутого в другому розділі, а також для побудови комплексної моделі й доменно-орієнтованого методу оцінювання якості ПЗ в ІКС.

1.5 Аналіз моделей і методів оцінки якості ПЗ в ІКС

На відміну від підрозділу 1.3, де було здійснено класифікацію методологічних напрямів, у цьому підрозділі увагу зосереджено на їх придатності до практичного використання в ІКС та на визначенні тих елементів, які можуть бути використані як основа для подальшого формування власної системи оцінювання.

Для ІКС принципове значення має не лише наявність моделі або методики оцінювання якості ПЗ, а й її придатність до застосування в умовах розподіленої архітектури, сервісної взаємодії, віртуалізованого розгортання, змінного навантаження та підвищених вимог до надійності, безпеки й масштабованості [4–7; 29]. Тому подальший аналіз доцільно спрямувати не на повторний опис методологій, а на встановлення того, наскільки вони відповідають вимогам сучасних ІКС.

Особливість ІКС полягає в тому, що якість ПЗ проявляється не лише на рівні відповідності функціональним вимогам або структурної організації коду, а й через фактичну поведінку системи під час експлуатації. Для таких систем важливими є затримка, пропускна здатність, втрати пакетів, доступність сервісу, стійкість до відмов, безпека взаємодії та здатність підтримувати заданий рівень QoS/SLA за різних профілів навантаження. У кіберфізичних та IoT-середовищах ці властивості доповнюються вимогами до стійкості, безпечної взаємодії

компонентів і збереження працездатності за умов зовнішніх впливів [46], а для мережевих середовищ важливими є також масштабованість і топологічна стабільність [47]. У системах IoT окреме значення мають ефективність функціонування, надійність і масштабованість як взаємопов'язані характеристики функціонування програмно-апаратної інфраструктури [48].

З цієї точки зору стандарти ISO/IEC 25010, ISO/IEC 25022 та ISO/IEC 25023 є найбільш послідовною нормативною основою для побудови системи оцінювання якості ПЗ [1–3]. Вони забезпечують термінологічну узгодженість, структуру характеристик якості та набір мір, які можуть бути використані для кількісного оцінювання. Проте для ІКС цього недостатньо без доменного профілювання метрик, визначення джерел даних, нормалізації різнорідних показників і механізму їх подальшого узагальнення. Тому SQuaRE доцільно розглядати як базову нормативну рамку, але не як завершений метод оцінювання якості ПЗ в ІКС.

Модель ISO/IEC 9126 має історичне значення як попередник сучасних моделей якості, однак її практична придатність для сучасних ІКС є обмеженою [23]. Вона може використовуватися для пояснення еволюції підходів до структурування якості, але поступається актуальним стандартам SQuaRE за повнотою, деталізацією та відповідністю сучасним вимогам до програмних систем.

Процесно-орієнтовані підходи, зокрема CMMI, TQM і Six Sigma, забезпечують організаційну основу для підвищення якості процесів розроблення та супроводу [18; 27–28]. Їх застосування може зменшувати ризик дефектів, підвищувати повторюваність процесів і покращувати керованість життєвого циклу ПЗ. Однак для ІКС ці підходи мають переважно допоміжний характер, оскільки вони не дають прямої відповіді на питання, як саме поводиться конкретний програмний компонент у реальному мережевому середовищі, під навантаженням або за зміни умов розгортання.

Класичні атрибутивні моделі McCall, Boehm і Dromey забезпечують концептуальне підґрунтя для аналізу якості ПЗ через систему факторів і

атрибутів [19–21]. Вони корисні для розуміння структури якості та взаємозв'язку між внутрішніми й зовнішніми властивостями програмного продукту. Проте ці моделі лише частково відповідають потребам ІКС, оскільки не враховують повною мірою мережеву взаємодію, сервісну композицію, контейнеризацію, програмно-керовані мережі, віртуалізацію функцій і змінну інтенсивність трафіку.

Методологія GQM є корисною для формування системи метрик, орієнтованої на конкретні цілі оцінювання [22]. У контексті ІКС вона дозволяє пов'язати вимірювані показники з технічними й сервісними цілями, наприклад із забезпеченням необхідного рівня затримки, пропускної здатності або надійності сервісу. Однак GQM не визначає самостійно ані нормативну модель якості, ані спосіб інтеграції різнорідних метрик у підсумкову оцінку. Тому цей підхід доцільно використовувати як інструмент профілювання метрик, а не як завершену модель оцінювання.

Багатокритеріальні підходи, зокрема MCDM-подібні методи, є важливими для ІКС, оскільки дозволяють зіставляти показники різної природи та формувати узагальнену оцінку на основі зважування критеріїв [24–26]. Їх перевага полягає в можливості врахування одночасно функціональних, продуктивних, надійнісних, безпекових та експлуатаційних властивостей. Разом з тим багатокритеріальна процедура потребує обґрунтованого набору показників, правил нормалізації, визначення ваг і перевірки чутливості результату до зміни умов функціонування.

Попередні публікації [14–17] відображають окремі етапи дослідження проблематики оцінювання якості ПЗ в ІКС, зокрема у контексті телекомунікаційних, авіаційних та безпекоорієнтованих середовищ. У них обґрунтовано актуальність урахування доменного контексту, однак питання побудови комплексної системи оцінювання якості ПЗ в ІКС потребує подальшої формалізації в межах дисертаційного дослідження.

Для узагальнення результатів аналізу в таблиці 1.3 подано зіставлення наявних моделей і методів за вимогами, які є визначальними саме для оцінювання якості ПЗ в ІКС.

Таблиця 1.3

Відповідність наявних моделей і методів вимогам оцінювання якості ПЗ в ІКС

Модель / підхід	Що забезпечує	Обмеження щодо ІКС	Придатність для використання в ІКС
ISO/IEC 25010, ISO/IEC 25022, ISO/IEC 25023	нормативну структуру характеристик якості та метричну основу	не задає завершеного механізму інтегральної оцінки та доменного профілювання метрик	висока як нормативна основа, але потребує адаптації
ISO/IEC 9126	історичну модель характеристик якості ПЗ	поступається актуальним стандартам SQuaRE за повнотою та сучасністю	обмежена, переважно методологічна
CMMI	оцінку зрілості процесів розроблення	не оцінює безпосередньо поведінку конкретного ПЗ в експлуатації	допоміжна, на рівні організації процесів
TQM / Six Sigma	підтримку безперервного вдосконалення процесів і зменшення дефектності	непряма оцінка якості ПЗ, без урахування мережевої динаміки	допоміжна
McCall / Boehm / Dromey	факторний опис якості програмного продукту	недостатнє врахування розподілених, сервісних і віртуалізованих архітектур	часткова, як концептуальна база
GQM	цілеспрямований добір метрик відповідно до цілей оцінювання	не задає власної моделі якості та механізму агрегування	корисна для профілювання системи метрик
MCDM-підходи	зважування, ранжування та узагальнення різнорідних критеріїв	потребують обґрунтованого набору метрик, нормалізації та перевірки чутливості	висока для інтеграції результатів

Наведене зіставлення свідчить, що наявні моделі та методи мають різну корисність для оцінювання якості ПЗ в ІКС, однак жоден із них окремо не забезпечує повного поєднання нормативної узгодженості, доменної релевантності, урахування експлуатаційної динаміки та механізму інтегральної інтерпретації результатів. Найбільш придатними для подальшого використання є ті підходи, які можуть бути поєднані між собою: стандартизована модель якості

– як основа структурування характеристик, GQM – як засіб цільового добору метрик, а багатокритеріальні методи – як інструмент узагальнення різнорідних показників.

Ключові обмеження традиційних підходів до оцінювання якості ПЗ в ІКС доцільно подати на рисунку 1.5.



Рис. 1.5. Ключові обмеження традиційних підходів до оцінювання якості ПЗ в ІКС

Змістовно ці обмеження полягають у тому, що традиційні підходи або фокусуються переважно на структурі якості програмного продукту, або оцінюють якість через зрілість процесів розроблення, або надають засоби добору окремих метрик без формування цілісної системи оцінювання. Для ІКС цього недостатньо, оскільки такі системи потребують одночасного врахування продуктових, експлуатаційних, мережевих, інфраструктурних і безпекових показників.

Для телекомунікаційних систем нового покоління обмеженість традиційних моделей проявляється особливо чітко. Наприклад, оцінювання функціональної придатності не дає відповіді на питання, чи зберігає програмний компонент необхідний рівень якості за різкого зростання кількості сесій. Оцінювання модульності не гарантує відсутності деградації затримки сигналізації. Висока зрілість процесів розроблення також не виключає проблем

із масштабованістю, доступністю або стійкістю до перевантаження. Отже, для ІКС потрібне зміщення акценту від формальної наявності характеристик якості до перевірки придатності ПЗ функціонувати в конкретному експлуатаційному середовищі.

З наукової точки зору важливим результатом аналізу є встановлення потреби в поєднанні двох рівнів адаптації. Перший рівень стосується доменного контексту: для 5G, IoT, SDN/NFV, кіберфізичних або авіаційних ІКС різні групи метрик можуть мати різну значущість. Другий рівень стосується сценарію використання: навіть у межах одного домену роль затримки, пропускної здатності, втрат пакетів, безпеки або відмовостійкості змінюється залежно від типу сервісу, критичності задачі та вимог SLA. Саме тому система оцінювання якості ПЗ в ІКС повинна бути не лише стандартизованою за структурою, а й профільованою за складом метрик.

Таким чином, аналіз моделей і методів оцінювання якості ПЗ у контексті ІКС показує, що наявні підходи формують важливе методологічне підґрунтя, але не усувають потреби в подальшій формалізації системи статичних і динамічних метрик, визначенні правил їх нормалізації та створенні механізму інтегральної інтерпретації результатів. Це безпосередньо підводить до постановки задач дисертаційного дослідження, пов’язаних із формуванням узгодженого метричного апарату, побудовою моделі та подальшою експериментальною перевіркою придатності сформованого підходу для сучасних ІКС.

1.6 Постановка задач дисертаційного дослідження

Проведений аналіз особливостей розроблення та функціонування ПЗ в ІКС засвідчив, що якість ПЗ в ІКС не може розглядатися лише як сукупність внутрішніх властивостей програмного продукту. Для таких систем істотне значення мають умови розгортання, мережева взаємодія, розподілена архітектура, віртуалізація, сервісна композиція, змінне навантаження, вимоги до

продуктивності, надійності, безпеки та підтримання заданого рівня QoS/SLA [4–7; 29; 46–48].

Аналіз нормативної основи оцінювання якості ПЗ показав, що стандарти сімейства SQuaRE забезпечують узгоджену систему характеристик, підхарактеристик і мір якості, однак не визначають завершеного механізму інтегрування різнорідних показників у єдину оцінку та не задають універсального складу доменно-специфічних метрик для ІКС [1–3]. Тому такі стандарти доцільно розглядати як методичну основу для подальшого формування системи оцінювання, але не як завершений інструмент кількісного аналізу якості ПЗ у розподілених і динамічних середовищах.

Розгляд існуючих методологій, моделей і методів оцінювання якості ПЗ засвідчив, що стандартизовані, процесно-орієнтовані, атрибутивні, цільово-метричні, багатокритеріальні та інженерні підходи мають важливе методологічне значення, однак кожен із них окремо має обмеження щодо застосування в ІКС [18–29; 45]. Зокрема, процесні підходи переважно характеризують зрілість організації розроблення, класичні атрибутивні моделі не повною мірою враховують експлуатаційну динаміку, GQM потребує опори на нормативну модель якості, а багатокритеріальні методи вимагають попередньо обґрунтованого набору показників, правил нормалізації та механізму інтерпретації результатів [18–26].

Аналіз метрик якості ПЗ показав, що для ІКС принциповим є поєднання статичних і динамічних показників. Статичні метрики дозволяють характеризувати продуктові властивості ПЗ, зокрема функціональну повноту, модульність, складність, супроводжуваність, контроль доступу та готовність до розгортання. Динамічні метрики відображають фактичну поведінку системи під час функціонування, зокрема затримку, пропускну здатність, втрати пакетів, доступність, стійкість до перевантаження, відновлюваність та інші експлуатаційні характеристики [2–3; 29; 46–48]. Водночас відкритим залишається питання їх узгодженого добору, нормалізації, зважування, агрегування та інтерпретації в межах єдиної системи оцінювання [24–26].

Окремі положення цієї проблематики апробовано та попередньо розглянуто в працях здобувача, зокрема щодо аналізу методів і моделей оцінювання якості ПЗ в ІКС, урахування безпекових показників та специфіки телекомунікаційних середовищ [14–17]. Водночас ці результати підтверджують актуальність напряму дослідження та не усувають потреби у формалізації цілісної системи метрик, моделі й методу оцінювання якості ПЗ в ІКС.

Узагальнення результатів аналізу дозволяє визначити основну науково-прикладну проблему, що полягає у недостатній формалізації методів і моделей оцінювання якості ПЗ в ІКС з урахуванням взаємозв'язку між продуктовими характеристиками ПЗ та його динамічною поведінкою в умовах реальної або наближеної до реальної експлуатації. Особливої актуальності ця проблема набуває для телекомунікаційних, IoT, SDN/NFV, хмарних і 5G-середовищ, у яких програмні компоненти функціонують у змінному мережевому та інфраструктурному контексті [4–7; 29; 46–48].

На підставі проведеного аналізу встановлено такі ключові обмеження існуючих підходів до оцінювання якості ПЗ в ІКС:

1. недостатнє врахування експлуатаційної динаміки, зокрема впливу змінного навантаження, затримок, втрат пакетів, обмежень пропускної здатності та часткових відмов компонентів;
2. обмежена придатність класичних моделей якості до оцінювання ПЗ у розподілених, сервісно-орієнтованих і віртуалізованих середовищах;
3. відсутність єдиної узгодженої системи статичних і динамічних метрик, адаптованої до особливостей ІКС;
4. недостатня формалізація процедур нормалізації, зважування та агрегування різнорідних показників якості;
5. обмежена доменна адаптація існуючих підходів до специфіки сучасних телекомунікаційних середовищ, зокрема ПЗ ядра 5G;
6. недостатня експериментальна перевірка підходів до оцінювання якості ПЗ в умовах, наближених до реальної експлуатації ІКС;

7. недостатня визначеність джерел даних, процедур відтворюваного вимірювання та правил інтерпретації отриманих значень для різних класів ІКС.

Зазначені обмеження визначають необхідність подальшого дослідження, спрямованого на формування системи метрик, побудову моделі та розроблення методу оцінювання якості ПЗ в ІКС, які враховують як статичні характеристики програмного продукту, так і динамічні параметри його функціонування.

Відповідно до сформульованої мети дослідження, для розв’язання поставленої науково-прикладної проблеми необхідно вирішити такі задачі:

1. Проаналізувати сучасний стан проблеми оцінювання якості ПЗ в ІКС, систематизувати існуючі стандарти, методології, моделі та метричні підходи, а також визначити їх обмеження щодо застосування в розподілених, віртуалізованих і сервісно-орієнтованих середовищах.

2. Сформувати узгоджену систему статичних і динамічних метрик оцінювання якості ПЗ в ІКС, яка враховує продуктові характеристики ПЗ, експлуатаційні параметри його функціонування та доменно-специфічні вимоги сучасних ІКС.

3. Обґрунтувати методичні засади нормалізації, зважування, агрегування, адаптивного коригування вагових коефіцієнтів та інтерпретації різнорідних показників якості ПЗ, необхідні для отримання порівнюваної та відтворюваної оцінки в умовах різних сценаріїв функціонування ІКС.

4. Розробити комплексну модель оцінювання якості ПЗ в ІКС на основі поєднання статичних і динамічних метрик, яка забезпечує можливість інтегрального подання результатів оцінювання та врахування впливу експлуатаційного контексту.

5. Розробити доменно-орієнтований метод оцінювання якості ПЗ ядра 5G, адаптований до сервісно-орієнтованої архітектури, особливостей функціонування мережевих функцій та вимог сучасних телекомунікаційних систем.

6. Провести експериментальну перевірку запропонованих моделі та методу в середовищах, наближених до умов експлуатації ІКС, із використанням

керованого навантаження, емуляції мережевих параметрів та інструментального моніторингу показників функціонування.

7. Формалізувати та експериментально перевірити здатність запропонованого доменно-орієнтованого методу забезпечувати покриття контрольних вимог до доменних метрик ПЗ ядра 5G шляхом зіставлення фактичних показників площини користувача із контрольними межами, визначеними для затримки, джитера та втрати пакетів, а також встановити відповідність отриманих результатів допустимим параметрам функціонування у визначених сценаріях навантаження.

8. Оцінити практичну придатність отриманих результатів для підтримки прийняття рішень щодо контролю якості, виявлення деградації, порівняння конфігурацій, оптимізації програмних компонентів та інтеграції процедур оцінювання якості в процеси розроблення, тестування й експлуатаційного моніторингу ПЗ в ІКС.

Отже, постановка задач дисертаційного дослідження випливає з установленої невідповідності між можливостями існуючих моделей і методологій оцінювання якості ПЗ та потребами сучасних ІКС. Подальше дослідження має бути спрямоване на перехід від загального опису характеристик якості до формалізованого оцінювання, у якому статичні властивості програмного продукту поєднуються з динамічними параметрами його функціонування. Така постановка забезпечує логічний перехід до другого розділу, у якому розглядається формування системи статичних і динамічних метрик оцінювання якості ПЗ в ІКС.

Висновки до першого розділу

У першому розділі проаналізовано особливості розроблення, впровадження та функціонування ПЗ в ІКС. Встановлено, що для ІКС характерні розподілена архітектура, мережева взаємодія, віртуалізація, сервісна композиція, змінні профілі навантаження та підвищені вимоги до продуктивності, надійності,

безпеки й підтримання заданого рівня QoS/SLA. Це зумовлює необхідність розглядати якість ПЗ не лише як сукупність внутрішніх властивостей програмного продукту, а й як характеристику його фактичної поведінки в умовах експлуатації [4–7; 29; 46–48].

Розглянуто нормативну основу оцінювання якості ПЗ у межах сімейства стандартів SQuaRE. Показано, що ISO/IEC 25010, ISO/IEC 25022 та ISO/IEC 25023 формують узгоджену систему характеристик, підхарактеристик і мір якості, однак не задають завершеної процедури інтегрування різнорідних показників у єдину оцінку та потребують доменного профілювання для застосування в ІКС [1–3].

Аналіз існуючих методологій, моделей і методів оцінювання якості ПЗ засвідчив, що стандартизовані моделі, процесно-орієнтовані підходи, класичні атрибутивні моделі, GQM та багатокритеріальні методи мають важливе методологічне значення, проте кожен із них окремо має обмеження щодо застосування в сучасних ІКС [18–29; 45]. Основними такими обмеженнями є недостатнє врахування експлуатаційної динаміки, відсутність єдиного механізму інтегрального оцінювання, обмежена доменна адаптація та потреба в попередньо обґрунтованій системі метрик.

Узагальнення наявних підходів показало, що для оцінювання якості ПЗ в ІКС принциповим є поєднання статичних і динамічних метрик. Статичні метрики характеризують продуктові властивості ПЗ, а динамічні – фактичну поведінку програмних компонентів під час функціонування, зокрема затримку, пропускну здатність, втрати пакетів, доступність, стійкість до перевантаження та відновлюваність. Водночас недостатньо формалізованими залишаються питання добору, нормалізації, зважування, агрегування та інтерпретації таких показників у межах єдиної системи оцінювання.

Встановлено, що наявні моделі й методи можуть бути використані як методологічне підґрунтя для подальшого дослідження, однак не забезпечують повною мірою вимог сучасних ІКС. Для таких систем необхідною є система оцінювання, яка спирається на стандартизовану модель якості, допускає доменне

профілювання метрик, враховує експлуатаційну динаміку та забезпечує можливість інтегральної інтерпретації результатів. Окремі аспекти цієї проблематики попередньо розглядалися у працях здобувача, що підтверджує актуальність напряму дослідження та необхідність подальшої формалізації цілісного підходу [14–17].

Отже, за результатами аналізу сформульовано науково-прикладну проблему, що полягає у недостатній формалізації методів і моделей оцінювання якості ПЗ в ІКС з урахуванням взаємозв’язку між продуктовими характеристиками ПЗ та його динамічною поведінкою в умовах експлуатації. Це обґрунтовує необхідність формування узгодженої системи статичних і динамічних метрик, визначення методичних засад їх нормалізації та агрегування, побудови моделі й методу оцінювання якості ПЗ в ІКС, а також їх експериментальної перевірки в середовищах, наближених до реального функціонування.

РОЗДІЛ 2
СТАТИЧНІ ТА ДИНАМІЧНІ МЕТРИКИ ОЦІНКИ ЯКОСТІ ПЗ В ІКС

У першому розділі встановлено, що наявні стандарти, моделі та методології оцінювання якості ПЗ створюють необхідне нормативне й теоретичне підґрунтя, однак не забезпечують повною мірою формалізованого врахування специфіки ІКС. Для таких систем визначальними є не лише властивості програмного продукту як артефакту розроблення, а й його поведінка в умовах експлуатації, змінного навантаження, мережевих впливів, вимог до безперервності сервісу та інтеграції з розподіленою інфраструктурою. Тому логічним продовженням попереднього аналізу є перехід від загального огляду моделей і підходів до обґрунтування метричного апарату, придатного для подальшої формалізації у комплексній моделі оцінювання.

З огляду на це метрики якості доцільно поділяти на статичні та динамічні. Статичні метрики характеризують внутрішні властивості програмного продукту та визначаються на основі аналізу вимог, архітектури, програмного коду, конфігурацій і результатів тестування без обов’язкового виконання ПЗ у цільовому середовищі. Динамічні метрики відображають якість функціонування ПЗ у процесі виконання та визначаються на основі моніторингу поведінки системи у середовищі, що відтворює експлуатаційні режими ІКС.

Такий поділ є методологічно обґрунтованим, оскільки дозволяє відокремити продуктову площину якості від експлуатаційної, але водночас не розривати їх під час подальшого інтегрування. Завдання цього розділу полягає не у введенні завершеної інтегральної моделі, а у формуванні науково обґрунтованої системи метрик: визначенні їх змісту, ролі, вимірюваності, взаємозв’язку, правил нормалізації, зважування й доменного профілювання. Математична інтеграція цих показників у комплексну модель оцінювання подається у третьому розділі.

Система метрик для ІКС не може зводитися до простого переліку показників, оскільки різнорідні характеристики якості мають бути приведені до

узгодженої логіки вимірювання, інтерпретації та подальшого агрегування. Для ІКС це особливо важливо, оскільки статичні й динамічні показники мають різну часову природу, різну чутливість до контексту функціонування та різну цінність для прийняття інженерних рішень. Саме тому потрібно приділити увагу не лише вибору метрик, а й формуванню правил їх узгодженого використання як основи для подальшого моделювання.

Для наочного подання взаємозв'язку між статичними та динамічними метриками на рисунку 2.1 наведено узагальнену структуру метрик оцінювання якості ПЗ в ІКС.

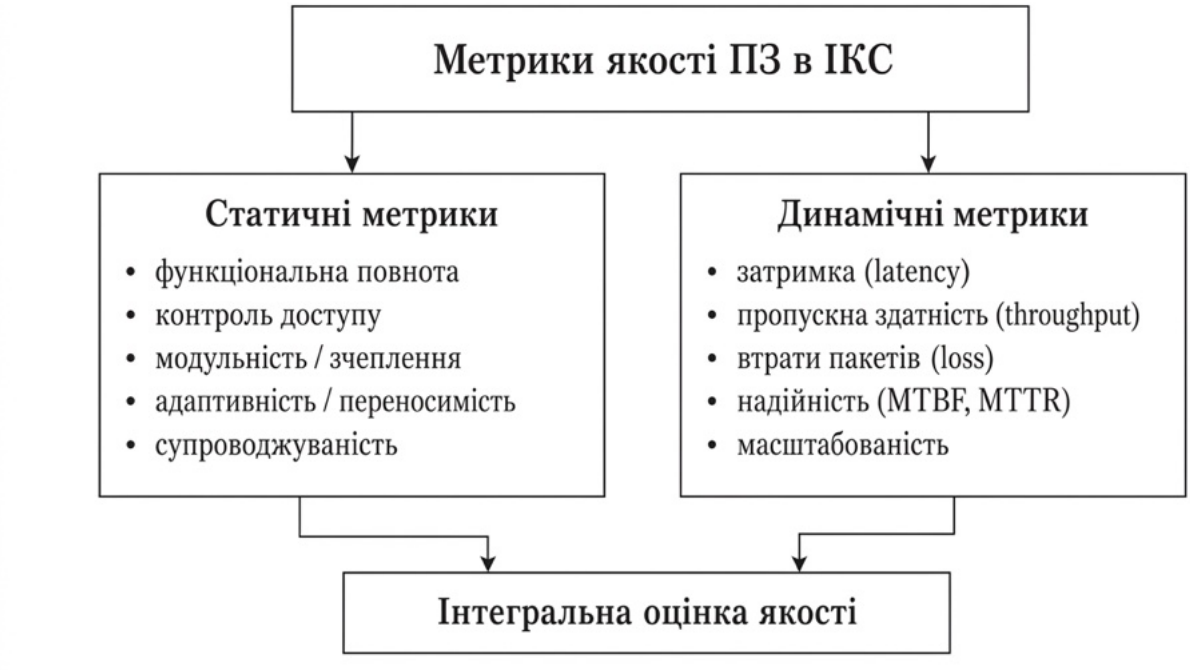

Рис. 2.1. Структура метрик оцінки якості ПЗ в ІКС

2.1 Статичні метрики якості ПЗ

Статичні метрики призначені для кількісного опису властивостей ПЗ як програмного продукту. Вони відображають ступінь відповідності реалізації вимогам, зрілість архітектурних рішень, якість структурної організації та готовність ПЗ до супроводу, адаптації й безпечного розгортання. Для ІКС статичні метрики мають особливе значення, оскільки саме на етапах

проєктування та розроблення закладаються передумови подальшої надійності, продуктивності, інтегрованості та стійкості системи [1–7].

У сучасних дослідженнях статичні показники якості пов’язуються не лише з описом структури програмного продукту, а й із прогнозуванням дефектів, виявленням потенційних вразливостей, оцінюванням сервісної якості та надійності програмних компонентів [45; 53–57]. Це дозволяє розглядати статичні метрики як ранні індикатори можливих проблем якості ще до етапу повномасштабної експлуатації.

Добір цих метрик є змістовно обмеженим і водночас достатнім для задач подальшого моделювання: вони охоплюють функціональну, структурну, безпекову та адаптаційну площини продуктової якості, не дублюючи одна одну. Такий підхід зменшує ризик надмірного ускладнення інтегральної оцінки та забезпечує можливість подальшого зіставлення статичної складової з динамічними результатами експериментального вимірювання.

У межах сімейства стандартів SQuaRE статична складова якості пов’язана насамперед із характеристиками моделі ISO/IEC 25010 та метриками якості програмного продукту, визначеними в ISO/IEC 25023 [1; 3]. Водночас для ІКС доцільним є уточнення базового набору метрик показниками, що характеризують структурну організацію сервісів, механізми контролю доступу, модульність і переносимість, оскільки саме ці аспекти впливають на придатність ПЗ до функціонування в розподілених телекомунікаційних і хмарних середовищах [4–7].

У межах другого розділу статичні метрики розглядаються як підготовлений набір показників для подальшої формалізації в комплексній моделі. Їх використання потребує нормалізації, визначення вагової значущості та узгодження з динамічними показниками; відповідні математичні процедури інтегрування подано у третьому розділі.

У таблиці 2.1 узагальнено базові статичні метрики, що використовуються для оцінювання якості ПЗ в ІКС та характеризують властивості програмного продукту незалежно від умов його виконання.

Таблиця 2.1

Базові статичні метрики оцінки якості ПЗ в ІКС

Характеристика якості	Підхарактеристика	Метрика	Приклад формалізації	Інтерпретація
Функціональна придатність	Функціональна повнота	Частка реалізованих функцій	$M_{fc} = \frac{N_{impl}}{N_{req}}$	Більше значення відповідає вищій повноті реалізації вимог
Безпека	Керованість доступу	Частка захищених ресурсів або операцій	$M_{AC} = \frac{N_{prot}}{N_{total}}$	Відображає ступінь реалізації політик доступу
Супроводжуваність	Модульність	Нормалізована метрика модульності	$M_{mod} = \frac{N_{ind}}{N_{mod}}$	Зростає за умови зниження зчеплення й підвищення керованості архітектури
Супроводжуваність	Аналізованість	Нормалізована складність коду	$M_{cx} = 1 - \frac{CC - CC_{min}}{CC_{max} - CC_{min}}$	Характеризує готовність ПЗ до модифікації та локалізації дефектів
Переносимість	Адаптивність	Частка підтримуваних середовищ розгортання	$M_{ad} = \frac{E_{supported}}{E_{target}}$	Відображає готовність ПЗ до роботи в різних конфігураціях ІКС

Наведені у таблиці 2.1 метрики не вичерпують усього спектра продуктових показників, проте вони формують мінімально достатню основу для оцінки якості ПЗ в ІКС. Зокрема, метрика функціональної повноти дозволяє формалізувати ступінь реалізації вимог, метрика контролю доступу – ступінь реалізації механізмів захисту, а показники модульності й складності – оцінити архітектурну керованість та потенційні ризики супроводу.

У межах ІКС статичні метрики виконують три взаємопов’язані функції: фіксують рівень готовності ПЗ до експлуатації, виступають індикаторами архітектурного та технологічного боргу, а також допомагають інтерпретувати

причини подальших динамічних відхилень. Наприклад, низька модульність, надмірна складність або недостатня адаптивність до середовища розгортання можуть не проявлятися як відмова під час первинного тестування, але підвищують ризик деградації під час масштабування, оновлення конфігурацій або зростання навантаження [1–7].

Практична цінність статичних метрик полягає у можливості попередньої ідентифікації ризиків і планування превентивних удосконалень: низький рівень функціональної повноти вказує на ризик невиконання цільових сценаріїв, недостатній контроль доступу – на безпекові прогалини, а погіршення модульності й складності – на потребу в рефакторингу або перегляді архітектурних рішень.

2.2 Динамічні метрики якості ПЗ

Динамічні метрики відображають якість ПЗ у процесі виконання та дають змогу оцінити фактичну поведінку програмних компонентів у середовищі, наближеному до експлуатаційного. На відміну від статичних метрик, динамічні показники безпосередньо залежать від профілю навантаження, характеристик мережі, режиму взаємодії компонентів, розподілу ресурсів, сценарію використання та тривалості спостереження. Тому їх інтерпретація є коректною лише за умови фіксації контексту вимірювання.

Для ІКС динамічні метрики мають оцінювати не лише часові характеристики виконання, а й поведінку системи у реальному або наближеному до реального середовищі. Це особливо важливо для систем реального часу, мікросервісних архітектур, NFV/5G-середовищ та програмно-керованих мереж, де якість ПЗ залежить від взаємодії сервісів, інфраструктури й мережевого навантаження [58–62].

Для ІКС ця група метрик є критично важливою, оскільки значна частина відмов або деградацій якості проявляється не на рівні структурних властивостей коду, а під час роботи системи під навантаженням. У телекомунікаційних

системах це насамперед затримка обробки запитів, пропускна здатність, втрати пакетів, стійкість до збоїв, час відновлення після відмов і масштабованість.

У цьому розділі динамічні метрики розглядаються як група вимірюваних експлуатаційних показників, що надалі можуть бути нормалізовані та використані в комплексній моделі оцінювання. Їх агрегування в частковий індекс динамічної якості доцільно виконувати вже на етапі побудови моделі, після визначення правил нормалізації, меж вимірювання та вагових коефіцієнтів.

Для кожної динамічної метрики доцільно визначати одиниці вимірювання, спосіб збору даних, період агрегації, умови навантаження, допустимі межі та напрям оптимізації. Без такого опису показники затримки, пропускної здатності, втрати пакетів, доступності або відновлюваності можуть бути формально виміряні, але залишатися непорівнюваними між різними сценаріями, стендами або класами ІКС.

У таблиці 2.2 узагальнено базові динамічні метрики, що використовуються для оцінювання якості ПЗ в ІКС та характеризують поведінку ПЗ під час функціонування в умовах навантаження й мережевих впливів.

Таблиця 2.2

Базові динамічні метрики оцінки якості ПЗ в ІКС

Група показників	Метрика	Позначення / формалізація	Напрям оптимізації	Призначення
Продуктивність	Середня затримка	$L_{(avg)} = \frac{1}{N}\sum_{k=1}^{N} t_k$	Менше – краще	Характеризує часову ефективність обробки запитів
Продуктивність	Пропускна здатність	$T = \frac{N_{succ}}{\Delta t}$	Більше – краще	Відображає здатність системи обробляти потік операцій
Якість мережевої взаємодії	Втрати пакетів	$P_{loss} = \frac{N_{lost}}{N_{sent}} \cdot 100\%$	Менше – краще	Оцінює деградацію якості передавання даних

Група показників	Метрика	Позначення / формалізація	Напрям оптимізації	Призначення
Надійність	Середній час безвідмовної роботи	$MTBF = \frac{\sum uptime}{n_{fail}}$	Більше – краще	Відображає інтенсивність появи відмов
Відновлюваність	Середній час відновлення	$MTTR = \frac{\sum t_{rec}}{n_{fail}}$	Менше – краще	Характеризує здатність швидко відновлювати сервіс
Масштабованість	Коефіцієнт масштабованості	$S = \frac{X_n}{(n \cdot X_1)}$	Більше – краще	Показує ефективність збільшення ресурсів або вузлів

З точки зору стандартів SQuaRE частина динамічних показників корелює з характеристиками продуктивності, надійності та якості у використанні, визначеними в ISO/IEC 25010, а метрична база деталізується в ISO/IEC 25022 та ISO/IEC 25023 [1–3]. Однак у контексті ІКС ці стандартизовані метрики мають бути доповнені показниками, що відображають специфіку телекомунікаційного та розподіленого середовища, зокрема мережеві затримки, втрати, масштабованість і стійкість сервісу за пікових режимів навантаження [4–7; 46–48].

Суттєвою особливістю динамічних метрик є їх контекстна чутливість. Одне й те саме ПЗ може демонструвати різні значення затримки, пропускної здатності чи втрат залежно від конфігурації мережі, типу навантаження, характеристик платформи та режиму розгортання. Це означає, що інтерпретація динамічних метрик повинна виконуватися лише в межах чітко визначеного контексту експлуатації, що є принципово важливим для побудови коректної методики оцінювання.

У таблиці 2.3 наведено умови коректного вимірювання базових динамічних метрик, що забезпечують відтворюваність та порівнюваність результатів оцінювання якості ПЗ в ІКС.

Таблиця 2.3

Умови коректного вимірювання базових динамічних метрик у середовищі ІКС

Метрика	Що необхідно зафіксувати під час вимірювання	Чому це важливо
Затримка	профіль навантаження, часове вікно, кількість паралельних сесій	дозволяє порівнювати затримку між сценаріями
Пропускна здатність	тип операцій, інтервал агрегації, стабільність інфраструктури	запобігає хибним висновкам через короткочасні піки
Втрата пакетів	джерело втрат, параметри NetEm або мережевий стан	дає змогу відрізнити мережеву деградацію від логічних помилок
MTBF / MTTR	критерій відмови, події відновлення, журнал інцидентів	забезпечує відтворюваність оцінки надійності
Масштабованість	крок зростання навантаження, характер розподілу ресурсів	показує, наскільки система зберігає якість при рості вимог

2.3 Взаємозв’язок статичних і динамічних метрик

Статичні та динамічні метрики відображають різні аспекти якості, однак у системах класу ІКС вони перебувають у тісному взаємозв’язку. Статичні характеристики задають передумови функціонування системи: архітектурна модульність, контроль доступу, якість реалізації та супроводжуваність визначають потенціал системи до масштабування, оптимізації та безпечного функціонування. Динамічні метрики, своєю чергою, відображають фактичний результат реалізації цього потенціалу в умовах реальної експлуатації.

У багатьох випадках між групами метрик виникають причинно-наслідкові зв’язки. Наприклад, висока модульність і низьке зчеплення компонентів створюють умови для горизонтального масштабування, що позитивно впливає на пропускну здатність і стійкість до навантаження. Натомість надмірне ускладнення логіки автентифікації або шифрування може поліпшувати

захищеність, але одночасно збільшувати час обробки запитів та зменшувати пропускну здатність.

Отже, для побудови коректної моделі оцінювання якості ПЗ в ІКС недостатньо розглядати статичні та динамічні метрики ізольовано. Необхідно враховувати їхню взаємодію, можливі причинно-наслідкові зв’язки та компроміси між характеристиками якості. Це дозволяє уникнути спрощеної ситуації, коли висока оцінка за однією групою показників штучно компенсує критичне погіршення іншої групи.

Динамічні метрики для ІКС мають розглядатися як принципово необхідні, оскільки саме вони відображають якість сервісу в умовах реального або наближеного до реального виконання. Для коректної інтерпретації затримки, пропускної здатності, втрати пакетів, джитеру чи доступності необхідно фіксувати не лише середні значення, а й профіль навантаження, часовий інтервал агрегації, кількість одночасних сесій, конфігурацію мережі та характеристики платформи.

Важливою властивістю динамічних метрик є здатність виявляти ранню деградацію до переходу системи у відмовний стан. Зростання затримки, поява втрат пакетів або зниження пропускної здатності часто мають пороговий і нелінійний характер, тому їх слід розглядати не ізольовано, а у зв’язку зі сценарієм навантаження, вимогами QoS/SLA та експлуатаційним контекстом ІКС.

Отже, динамічна складова фіксує фактичну якість сервісу, дозволяє виявляти ранню деградацію, відображає порогові ефекти навантаження та створює основу для подальшої інтеграції технічної оцінки якості з експлуатаційною аналітикою ІКС.

У таблиці 2.4 наведено типові зв’язки між статичними та динамічними метриками, що відображають вплив властивостей програмного продукту на його поведінку під час функціонування в середовищі ІКС.

Таблиця 2.4

Типові зв’язки між статичними та динамічними метриками

Статична метрика / аспект	Динамічні показники, на які впливає	Характер впливу	Інтерпретація для ІКС
Модульність, низьке зчеплення	Пропускна здатність, масштабованість, MTTR	Переважно позитивний	Спрощує локалізацію вузьких місць, масштабування та відновлення сервісів
Функціональна повнота	Експлуатаційна ефективність, надійність	Залежить від якості реалізації	Неповна реалізація функцій знижує результативність використання системи
Контроль доступу і захищеність	затримка, пропускна здатність	Подвійний: позитивний для безпеки, негативний для часу обробки	Підвищення захисту може створювати обчислювальні накладні витрати
Складність коду	Надійність, MTTR	Негативний	Зростання складності ускладнює пошук дефектів і відновлення працездатності
Адаптивність / переносимість	Стабільність розгортання, масштабованість	Позитивний	Покращує придатність до роботи в гетерогенних середовищах ІКС

Дані таблиці 2.4 свідчать, що зв’язок між групами метрик не є однозначно лінійним. У реальних ІКС підвищення однієї характеристики може призводити як до поліпшення, так і до погіршення окремих динамічних параметрів. Тому подальше моделювання якості повинно враховувати не лише абсолютні значення показників, а й характер їх взаємодії та можливі компроміси між продуктовою, експлуатаційною, мережевою й безпековою складовими.

З науково-методичної точки зору цей висновок є підставою для роздільного обчислення статичної та динамічної складових якості з подальшим керованим агрегуванням. Така схема забезпечує прозорість інтерпретації: можна встановити не лише загальний рівень якості, а й те, яка саме група показників формує позитивний або негативний внесок у підсумкову оцінку.

На структурній схемі рисунку 2.2 наведено схематичне зображення взаємозв’язку статичних та динамічних метрик.

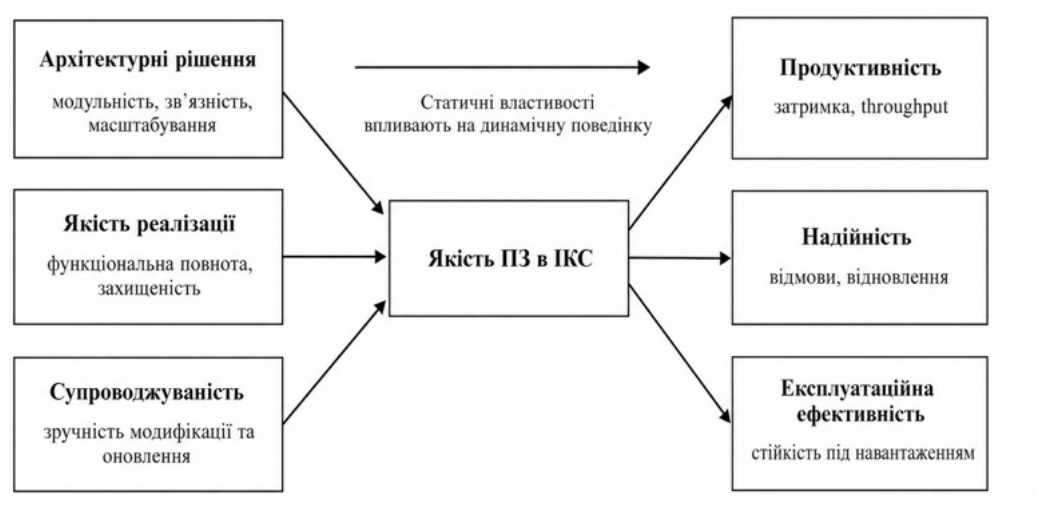

Рис. 2.2. Взаємозв’язок статичних і динамічних метрик оцінки якості ПЗ в ІКС

Для побудови системи оцінювання важливо не тільки встановити наявність зв’язку між статичними та динамічними метриками, а й забезпечити його інтерпретованість. Статичні метрики дозволяють оцінити, які властивості закладено у програмний продукт, а динамічні – як ці властивості проявляються в умовах функціонування ІКС. Саме така логіка створює підґрунтя для подальшої формалізації комплексної моделі у третьому розділі.

2.4 Формування набору метрик для оцінки якості ПЗ в ІКС

Формування набору метрик є ключовим етапом методики оцінювання, оскільки саме від коректності відбору показників залежить повнота, об’єктивність, інтерпретованість та відтворюваність результатів. Універсального незмінного набору метрик для всіх типів ІКС не існує, тому добір показників має виконуватися з урахуванням архітектури системи, режимів її функціонування, предметної області, вимог до якості та доступності даних для вимірювання.

Під час формування набору метрик необхідно враховувати не тільки повноту покриття характеристик ISO/IEC 25010 [1–3], а й невизначеність вимог, практики DevOps/CI/CD [63], вимоги інформаційної безпеки та класифікації

вразливостей [65–68; 78–79]. Таке поєднання дозволяє пов’язати якість ПЗ із процесами розроблення, експлуатаційного контролю, управління ризиками та безпечного функціонування ІКС.

Формування набору метрик ґрунтується на поєднанні двох підходів. По-перше, ISO/IEC 25010 використовується як референтна модель характеристик і підхарактеристик якості. По-друге, логіка Goal–Question–Metric застосовується для конкретизації цілей оцінювання та переведення цих цілей у систему вимірюваних показників. Це дозволяє уникнути формального включення надмірної кількості метрик і зосередитися на тих, що справді відображають якість конкретної ІКС.

Критеріями відбору метрик є: релевантність до задач оцінювання, вимірюваність, інтерпретованість, відтворюваність та придатність до нормалізації й агрегування. Зазначені критерії забезпечують сумісність різнорідних метрик у межах єдиної комплексної оцінки та створюють основу для подальшої автоматизації оцінювання у тестових стендах і системах моніторингу.

Окремо слід враховувати критерій недубльованості: дві метрики не повинні описувати один і той самий прояв якості без додаткової інтерпретаційної цінності. Це важливо для інтегрального оцінювання, оскільки дублювання показників може штучно посилювати вагу певної характеристики та спотворювати підсумковий результат.



Рис. 2.3. Процес формування набору метрик для оцінки якості ПЗ в ІКС

На рисунку 2.3 подано узагальнену схему формування набору метрик для оцінювання якості ПЗ в ІКС, що відображає послідовність відбору, групування та узгодження показників.

Відбір метрик доцільно завершувати визначенням правил їх підготовки до подальшого моделювання. Для кожної метрики необхідно встановити напрям оптимізації, джерело даних, етап життєвого циклу, умови вимірювання та можливість приведення до єдиної шкали. Така підготовка забезпечує порівнюваність різнорідних показників без передчасного введення інтегрального індексу в межах цього розділу.

Наукова доцільність такої процедури полягає в тому, що метрика включається до системи оцінювання не за фактом її доступності, а за умови виконання трьох вимог: вона має бути пов’язана з характеристикою якості, мати визначений спосіб вимірювання та бути придатною до подальшої нормалізації. Саме це забезпечує відтворюваність результатів і зменшує суб’єктивність під час вибору показників.

На рисунку 2.4 наведено узагальнену схему підготовки метрик до подальшого моделювання, що охоплює етапи їх нормалізації, зважування, перевірки узгодженості та підготовки до інтегрального оцінювання якості ПЗ в ІКС.



Рис. 2.4. Узагальнена послідовність підготовки метрик до подальшого моделювання

Подальше використання відібраних метрик передбачає їх нормалізацію, групування за статичною та динамічною складовими і визначення вагової

значущості. Математичні залежності, що описують агрегування цих груп у часткові та загальний індекси якості, наведено у третьому розділі.

Таблиця 2.5

Рекомендований набір метрик для комплексної оцінки якості ПЗ в ІКС

Група	Метрика/кількісний показник	Джерело даних	Життєвий цикл / етап	Напрям нормалізації
Статична	Частка реалізованих функціональних вимог (M_{FC})	аналіз вимог, результати тестів	проєктування / тестування	більше – краще
	Покриття політик контролю доступу (M_{AC})	модель безпеки, конфігурації, аудит	проєктування / верифікація	більше – краще
	Індекс модульності / слабкого зчеплення (M_{MOD})	архітектурний аналіз, ревью коду	розроблення	більше – краще
	Нормалізований показник складності коду (M_C)	статичний аналіз коду	розроблення / тестування	більше – краще після інверсії
	Індекс адаптивності до середовища розгортання (M_{AC})	документація розгортання, CI/CD	розгортання	більше – краще
Динамічна	Середня затримка обробки / передачі (M_L)	моніторинг, навантажувальні тести	експлуатація / випробування	менше – краще
	Пропускна здатність (M_{TH})	моніторинг, логування, тестовий стенд	експлуатація / випробування	більше – краще
	Частка втрат пакетів (M_{PL})	мережевий моніторинг	експлуатація / випробування	менше – краще
	Середній час між відмовами (MTBF)	журнали подій та інцидентів	експлуатація	більше – краще
	Середній час відновлення (MTTR)	журнали інцидентів, служба підтримки	експлуатація	менше – краще
	Індекс масштабованості (M_S)	тестовий стенд, сценарії росту навантаження	випробування	більше – краще

Набір, поданий у таблиці 2.5, розглядається як базова узгоджена система показників для ІКС. У конкретних прикладних реалізаціях він може

розширюватися залежно від предметної області. Наприклад, для ПЗ ядра 5G можливим є введення спеціалізованих показників затримки сигналізації, стійкості до перевантажень, енергоефективності на сесію та специфічних параметрів взаємодії з NFV/SDN-компонентами.

Побудова набору метрик для ІКС повинна враховувати не лише структуру показників, а й процедуру їх життєвого циклу всередині самої системи оцінювання. У роботі ця процедура включає чотири стадії: формування вихідного переліку метрик, перевірку їх релевантності та недубльованості, адаптацію до конкретного класу ІКС та подальше закріплення у моделі оцінювання. Така багатокрокова процедура дозволяє уникнути поширеної помилки, коли до інтегральної оцінки потрапляє надмірно широкий і погано узгоджений перелік показників.

Для систем телекомунікаційного профілю важливим є також розмежування метрик базової придатності та метрик операційного ризику. До першої групи належать показники, які визначають загальну готовність програмного продукту до експлуатації: функціональне покриття, модульність, контроль доступу, адаптивність. До другої – метрики, за якими можна оперативно виявити тенденцію до деградації сервісу: затримка, втрата пакетів, MTTR, відмовостійкість, стійкість до пікових навантажень. Саме поєднання цих двох груп і забезпечує змістовну повноту інтегральної оцінки.

Додаткового обґрунтування потребує питання нормалізації. Якщо правила нормалізації вибрані невдало, то навіть коректно виміряні метрики можуть спричинити викривлення інтегральної оцінки. Саме тому для кожної групи показників необхідно закласти явне врахування напряму оптимізації, допустимих меж варіації та логіки профільного застосування.

Не менш важливим є питання формування вагових коефіцієнтів. У дослідженні виходять із того, що вага метрики не є її «внутрішньою» властивістю, а відображає пріоритет конкретного сценарію оцінювання. Для одних систем у центрі уваги перебуває затримка, для інших – пропускна здатність, відмовостійкість або керованість доступу. Тому система ваг не може

бути раз і назавжди фіксованою; вона має визначатися відповідно до типу ІКС, критичності сервісу та режиму функціонування.

У практичних умовах формування набору метрик пов’язане також із вартістю отримання даних. Частина показників легко збирається автоматично, інша потребує спеціалізованих засобів моніторингу, а деякі – експертної інтерпретації або побудови допоміжних сценаріїв випробування. Для того щоб система оцінювання залишалася придатною до регулярного використання, у роботі пріоритет надається тим метрикам, які є достатньо інформативними і водночас допускають стабільне отримання даних у тестових або продуктивних середовищах.

Окреме місце займає можливість подальшого розширення набору метрик. Для ІКС це є принциповим, оскільки поява нових сервісних моделей, мережевих архітектур або вимог до безпеки неминуче призводить до потреби вводити нові показники. Проте таке розширення має відбуватися контрольовано – через узгодження з моделлю характеристик якості, через нормалізацію та через перевірку відсутності дублювання з уже наявними метриками. Саме в такому вигляді запропонована система метрик є відкритою до подальшого розвитку.

У таблиці 2.6 наведено етапи життєвого циклу метрик, що охоплюють їх вибір, нормалізацію, зважування, агрегування, інтерпретацію та використання в комплексній системі оцінювання якості ПЗ в ІКС.

Таблиця 2.6

Етапи життєвого циклу метрик у комплексній системі оцінювання якості ПЗ в ІКС

Етап	Зміст	Результат етапу
ідентифікація	виявлення релевантних характеристик і підхарактеристик якості	початковий перелік можливих метрик
відбір	перевірка вимірюваності, інтерпретованості та недубльованості	узгоджений набір показників
профілювання	налаштування метрик і ваг під конкретний домен ІКС	профіль оцінювання для сценарію

Етап	Зміст	Результат етапу
експлуатаційний перегляд	перевірка адекватності метрик за результатами експериментів і релізів	оновлення або розширення набору метрик
підготовка до інтегрування	нормалізація та групування статичних і динамічних показників	метрично узгоджений набір для подальшої моделі

Узгодження набору метрик завершується перевіркою його недубльованості, вимірюваності, відтворюваності та інтерпретаційної придатності. Для статичних метрик критичною є повнота вимог, архітектурної документації та результатів статичного аналізу, тоді як для динамічних – сталість експериментального стенда, коректність сценаріїв навантаження та якість телеметричних даних. Саме ці умови забезпечують можливість подальшого формального подання вибору метрик як функції архітектури, вимог, сценаріїв, життєвого циклу, доступності даних і домену застосування.

Формування набору метрик у дослідженні ґрунтується на тому, що вибір показників є функцією не лише моделі якості, а й архітектури програмного засобу, вимог до нього, сценаріїв функціонування, етапу життєвого циклу та доступності інструментальних даних. У загальному вигляді це можна подати так:

$$M_{sel} = \psi(A, R, S, L, D, T) \qquad (2.1)$$

де M_{sel} – сформований набір метрик для оцінювання якості ПЗ; A – архітектура програмного засобу; R – функціональні та нефункціональні вимоги; S – сценарії функціонування і профілі навантаження; L – етап життєвого циклу ПЗ; D – доступність і якість інструментальних даних; T – домен застосування ІКС.

Таблиця 2.7

Фактори, що визначають вибір метрик оцінювання якості ПЗ в ІКС

Фактор відбору	Методичний зміст	Вплив на склад метрик
Архітектура ПЗ	Тип архітектури, ступінь розподіленості, сервісна декомпозиція, наявність контрольної та користувацької площин	Визначає потребу в метриках модульності, зчеплення, затримки між сервісами, масштабованості та відмовостійкості

Фактор відбору	Методичний зміст	Вплив на склад метрик
Вимоги до якості	Функціональні, продуктивнісні, безпекові, надійнісні та експлуатаційні вимоги	Визначає пріоритетність функціональної повноти, контролю доступу, затримки, пропускної здатності, затримки тощо
Сценарії функціонування	Нормальний режим, пікове навантаження, часткові відмови, оновлення конфігурацій	Зумовлює включення динамічних метрик, чутливих до навантаження і деградації сервісу
Етап життєвого циклу	Проєктування, тестування, передрелізний контроль, експлуатаційний моніторинг	Визначає співвідношення між статичними та динамічними метриками
Інструментальна спостережуваність	Доступність логів, трас, телеметрії, результатів статичного аналізу	Обмежує або розширює перелік реально вимірюваних показників
Домен застосування	5G Core, SDN, IoT, хмарно-орієнтовані сервіси, кіберфізичні системи	Формує потребу в доменному профілюванні метрик
Ризики та критичність сервісу	Ціна деградації або відмови окремих функцій	Впливає на вагову значущість метрик і пріоритети їх відбору

У таблиці 2.7 наведено основні фактори, які впливають на вибір метрик оцінювання якості ПЗ в ІКС з урахуванням типу системи, умов її функціонування, доменної специфіки та вимог до експлуатаційної якості.

Для комплексної моделі оцінювання якості ПЗ в ІКС формується власний перелік метрик, оскільки вона орієнтована на міждоменне застосування і має забезпечувати порівнюваність результатів для різних класів систем. До такого переліку включаються лише ті показники, які мають усталене змістове трактування, можуть бути виміряні в більшості ІКС та відображають як продуктові, так і експлуатаційні властивості ПЗ [1–3; 22; 46–48].

$$M_{\text{CM}} = M_{stat}^{base} \cup M_{dyn}^{base} \tag{2.2}$$

де M_{stat}^{base} – міждоменний набір базових статичних метрик, а M_{dyn}^{base} – міждоменний набір базових динамічних метрик. Саме тому в комплексній моделі обираються функціональна повнота, контроль доступу, модульність, складність і адаптивність, а також пропускна здатність, частка втрат пакетів, доступність,

відновлюваність і масштабованість як показники, релевантні для широкого класу ІКС.

Формула (2.2) відображає, що перелік метрик комплексної моделі формується як об’єднання базових статичних і динамічних показників. Таке подання не визначає процедуру інтегрального розрахунку якості, а фіксує склад метричного апарату, який надалі використовується для побудови комплексної моделі оцінювання.

Натомість для доменного методу оцінювання ПЗ ядра 5G формується профільований набір показників, який поєднує міждоменне ядро метрик із доменно-специфічними характеристиками 5G Core:

$$M_{5GC} = M_{CM} \cup M_{5GC}^{spec}, \quad (2.3)$$

де M_{5GC} – профільований набір метрик для доменного методу оцінювання якості ПЗ ядра 5G, M_{CM} – базовий набір метрик комплексної моделі оцінювання якості ПЗ в ІКС, M_{5GC}^{spec} – множина доменно-специфічних метрик, характерних саме для ПЗ ядра.

Формула (2.3) відображає, що набір метрик для доменного методу оцінювання якості ПЗ ядра 5G формується шляхом доповнення базового міждоменного набору метрик комплексної моделі M_{CM} – доменно-специфічними показниками M_{5GC}^{spec}.

До таких показників належать метрики, що характеризують особливості сервісно-орієнтованої архітектури, взаємодію мережевих функцій, затримку сигналізаційних процедур, масштабованість за кількістю UE/сесій, відмовостійкість, сумісність із NFV/SDN-середовищем та енергоефективність.

У таблиці 2.8 наведено обґрунтування вибору метрик для комплексної моделі оцінювання якості ПЗ в ІКС та доменного профілю 5G Core з урахуванням їхньої ролі у відображенні статичних, динамічних і доменно-специфічних характеристик.

Таблиця 2.8

Обґрунтування складу метрик для комплексної моделі та доменного профілю 5G Core

Аспект формування набору метрик	Комплексна модель для ІКС	Доменний профіль для 5G Core
Мета	Порівнюване оцінювання різних класів ІКС	Оцінювання придатності ПЗ ядра 5G до експлуатації в SBA-середовищі
Принцип відбору	Універсальність, відтворюваність, міждоменна інтерпретованість	Архітектурна релевантність до мережевих функцій та 5G-сценаріїв
Статичні метрики	Функціональна повнота, контроль доступу, модульність, складність, адаптивність	Ті самі базові метрики, але з підвищеною увагою до інтеграції NF та політик доступу
Динамічні метрики	затримка, пропускна здатність, втрата пакетів, доступність, відновлюваність, масштабованість	затримка сигналізації, пропускна здатність площини користувача, доступність NF, відмовостійкість, масштабованість, енергоефективність
Джерела даних	Вимоги, код, конфігурації, логи, телеметрія, моніторинг	SBI-трафік, логи NF, метрики UPF/AMF/SMF, телеметрія інфраструктури
Критерій достатності	Покриття основних статичних і динамічних властивостей ПЗ в ІКС	Покриття властивостей, критичних для контрольної та користувацької площин 5G Core
Результат	Узгоджений метричний фундамент для подальшої моделі	Профільований набір метрик для доменного методу 5G Core

2.5 Методичні аспекти нормалізації, зважування та інтерпретації метрик

Нормалізація метрик у межах комплексної системи оцінювання є не допоміжним технічним прийомом, а окремим методичним завданням. Для ІКС це особливо важливо через різну природу показників: частина з них є часовими, частина – відносними, частина – структурними або логічними. Без приведення метрик до єдиної шкали стає неможливим не лише їх арифметичне агрегування,

а й змістовне порівняння між альтернативними реалізаціями, версіями або режимами роботи.

Нормалізація будується на принципі збереження напряму інтерпретації: більші значення нормованої міри завжди мають відповідати кращому стану системи. Це означає, що для показників типу «чим більше – тим краще» застосовується пряма форма нормалізації, а для показників типу «чим менше – тим краще» – інверсійна. Такий підхід уніфікує процедуру подальшого зважування і робить інтегральний результат інтерпретованим для інженерного аналізу.

Для показників-стимуляторів, збільшення яких відповідає покращенню якості, доцільно використовувати пряму мінімаксну нормалізацію:

$$\widetilde{m}_i^{(+)} = \frac{m_i - m_i^{min}}{m_i^{max} - m_i^{min}}, \tag{2.4}$$

де m_i – фактичне значення i-ї метрики, m_i^{min} та m_i^{max} – мінімальне та максимальне допустимі або емпірично визначені значення цієї метрики, $\widetilde{m}_i^{(+)}$– нормалізоване значення метрики-стимулятора.

Для показників-дестимуляторів, зменшення яких відповідає покращенню якості, використовується обернена форма нормалізації:

$$\widetilde{m}_i^{(-)} = \frac{m_i^{max} - m_i}{m_i^{max} - m_i^{min}}, \tag{2.5}$$

де $\widetilde{m}_i^{(-)}$– нормалізоване значення метрики-дестимулятора, m_i^{min} та m_i^{max} мають той самий зміст, що й у формулі (2.4). Інверсійна форма забезпечує єдину інтерпретацію: після нормалізації більше значення $\widetilde{m}_i$ завжди відповідає кращому стану якості

Для метрик, що мають цільове або порогове значення, зокрема SLA-орієнтованих показників затримки, пропускної здатності чи доступності, доцільним є використання цільової нормалізації:

$$\widetilde{m}_i^{(SLA)} = \begin{cases} \min\left(\frac{m_i}{m_i^{target}}, 1\right) & \text{, якщо збільшення } m_i \text{ покращує якість,} \\ \min\left(\frac{m_i^{target}}{m_i}, 1\right) & \text{, якщо зменшення } m_i \text{ покращує якість.} \end{cases} \quad (2.6)$$

Де m_i^{target} – цільове або гранично допустиме значення метрики відповідно до SLA, QoS або експлуатаційних вимог, $\widetilde{m}_i^{(SLA)}$ – нормалізоване значення метрики з урахуванням цільового порога.

Для показників різної спрямованості цільова нормалізація має застосовуватися з урахуванням того, чи є метрика стимулятором або дестимулятором.

На рисунку 2.5 наведено приклад нормалізації показників різної спрямованості, що демонструє приведення метрик із протилежною інтерпретацією до єдиної шкали оцінювання.

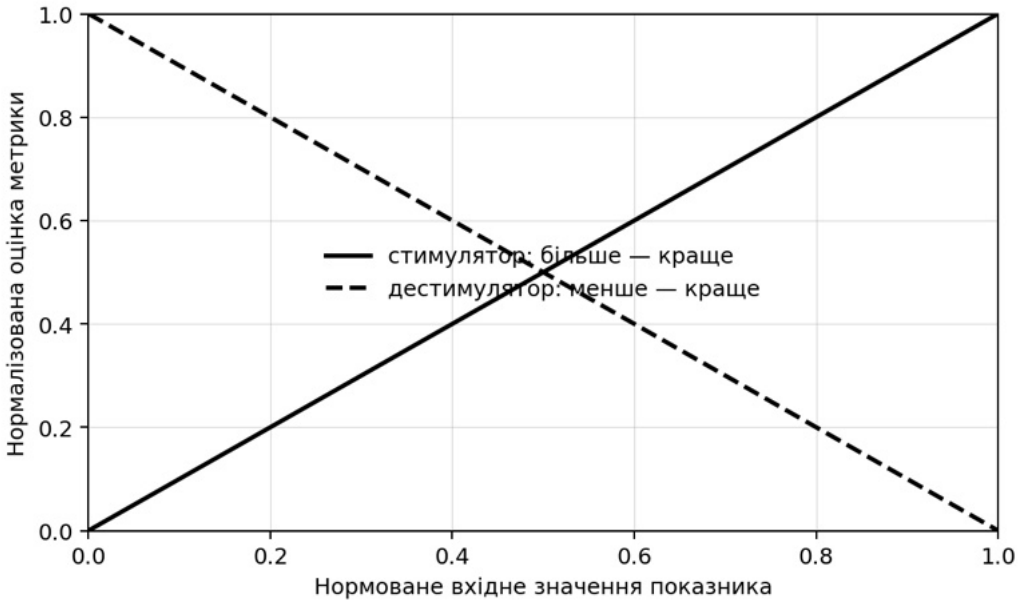

Рис. 2.5. Приклад нормалізації показників різної спрямованості

Питання вибору меж нормалізації є самостійною проблемою. Якщо межі визначено надто широко, інтегральна оцінка втрачає чутливість до змін показника; якщо надто вузько – незначні флуктуації можуть спричиняти непропорційно великі зміни інтегрального результату. Тому для ІКС доцільно

визначати межі не довільно, а на основі поєднання нормативних вимог, емпіричних спостережень і сценаріїв навантаження, релевантних до конкретного домену.

Якщо фактичне значення виходить за межі обраного інтервалу, нормалізовану величину доцільно обмежувати діапазоном [0; 1]. Це запобігає появі некоректних значень під час агрегування та робить результати порівнюваними між різними сценаріями експерименту.

Зважування метрик виконує роль механізму відображення пріоритетів оцінювання. Вагові коефіцієнти мають формуватися з урахуванням критичності сценарію, типу сервісу, вимог SLA та ризику деградації. У другому розділі зважування розглядається як принцип підготовки метрик до подальшої інтеграції; конкретний математичний механізм визначення та коригування ваг подано в розділі 3.

Система вагових коефіцієнтів для обраного набору метрик повинна задовольняти умови невід'ємності та нормованості:

$$W = \{w_1, w_2 \dots, w_n\}, \qquad w_i \geq 0, \qquad \sum_{i=1}^{n} w_i = 1, \tag{2.7}$$

де W – множина вагових коефіцієнтів метрик, w_i – ваговий коефіцієнт i-ї метрики, n – кількість метрик у відповідному наборі; умова $w_i \geq 0$ означає невід'ємність вагових коефіцієнтів, умова $\sum_{i=1}^{n} w_i = 1$ означає їх нормованість.

Умова нормованості забезпечує порівнюваність внеску окремих метрик і дає змогу надалі використовувати вагові коефіцієнти під час агрегування показників у межах комплексної моделі оцінювання.

Інтерпретація результатів оцінювання не може обмежуватися констатацією високого або низького рівня якості. Методично коректним є багаторівневий аналіз, у якому загальна оцінка має доповнюватися розглядом внеску окремих груп і часткових метрик. Це дозволяє відрізняти структурні проблеми реалізації від проблем експлуатаційної стійкості та формувати цілеспрямовані рекомендації щодо вдосконалення ПЗ.

Отже, нормалізація, зважування та інтерпретація метрик мають власний методичний статус. Вони забезпечують порівнюваність різнорідних показників, підвищують змістовність подальшої інтегральної оцінки та створюють підґрунтя для адаптації процедури оцінювання до різних класів ІКС.

2.6 Особливості використання метричного апарату для різних класів ІКС

Хоча базовий набір метрик, сформований у розділі, є узгодженим і придатним до подальшого моделювання, його практичне використання в різних класах ІКС має власні особливості. Для систем мережевого керування та SDN-контролерів першочергове значення мають показники затримки, пропускної здатності, контроль доступу, модульність і швидкість відновлення після збоїв. Для IoT-платформ важливішими стають стійкість до втрат, масштабованість, переносимість розгортання та ефективність обробки великих потоків подій. Для сервісно-орієнтованих хмарних систем, своєю чергою, значущими є модульність, складність коду, стабільність взаємодії мікросервісів і чутливість до зміни конфігурації.

Для інтерпретації динамічних метрик у мережевих ІКС доцільно враховувати доступність телекомунікаційної інфраструктури, сценарні ризики, властивості трафіку та QoS-орієнтовані вимоги. Такі показники є особливо важливими під час аналізу пікових навантажень, часткових відмов, DoS/DDoS-подібних впливів і сервісів із підвищеними вимогами до часу передавання повідомлень [65–68].

Як приклад доменного профілю доцільно розглянути ядро мережі 5G на базі платформи з відкритим кодом free5GC. Відповідно до сервісно-орієнтованої архітектури 3GPP та реалізації free5GC мережеві функції AMF, SMF, UPF, PCF, UDM, UDR, AUSF, NSSF і NRF взаємодіють як окремі сервіси. Тому вибір метрик для доменного методу має відображати не лише стан окремих компонентів, а й якість їх системної взаємодії, стійкість сервісної композиції та поведінку контрольної й користувацької площин [4; 49].

На рисунку 2.6 наведено узагальнену архітектурну схему ядра 5G на базі free5GC, що відображає взаємодію основних мережевих функцій у межах сервісно-орієнтованої архітектури.

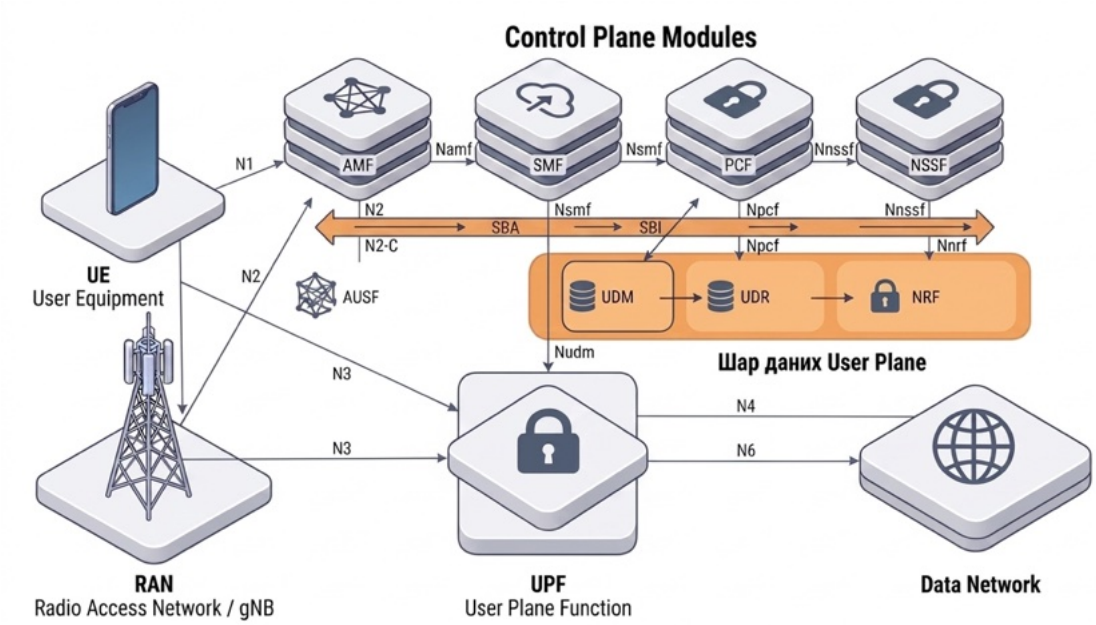

Рис. 2.6. Узагальнена архітектурна схема ядра 5G на базі free5GC

Архітектура free5GC безпосередньо обґрунтовує склад доменного профілю метрик. Для контрольної площини найбільш релевантними є затримка сигналізаційних процедур, доступність мережевих функцій, коректність маршрутизації запитів через NRF і стійкість до часткових відмов. Для площини користувача визначальними стають пропускна здатність, втрати пакетів і затримка передавання через UPF. Розподілений характер розгортання та сервісна декомпозиція додатково зумовлюють потребу в метриках масштабованості, відновлюваності, відмовостійкості та спостережуваності. Результати досліджень відкритих реалізацій 5G Core підтверджують, що саме ці показники є чутливими до архітектурних рішень, навантаження та конфігурації середовища [49–51; 59].

У таблиці 2.9 наведено зіставлення основних компонентів free5GC з найбільш релевантними метриками доменного профілю, що дає змогу обґрунтувати вибір показників для оцінювання якості ПЗ ядра 5G.

Таблиця 2.9

Відповідність компонентів free5GC найбільш релевантним метрикам доменного профілю

Компонент / контур free5GC	Найбільш релевантні метрики	Причина включення до доменного профілю
AMF	затримка реєстрації, доступність, відновлюваність	AMF визначає стабільність процедур реєстрації та мобільності в контрольній площині
SMF	затримка встановлення PDU session, відмовостійкість, масштабованість	SMF керує сесіями та політиками маршрутизації, тому чутливий до пікового навантаження
UPF	пропускна здатність, частка втрат пакетів, одностороння затримка	UPF визначає якість площини користувача та реальний рівень сервісу для трафіку даних
AUSF / UDM / UDR	успішність автентифікації, доступність, метрики доступу які пов’язані з безпек	Від цих функцій залежить коректність і безпечність доступу абонентів
NRF / NSSF / PCF	доступність сервісної взаємодії, узгодженість політик, затримка виявлення сервісів	Вони забезпечують узгодженість політик і сервісну оркестрацію у SBA
Система в цілому	масштабованість, відмовостійкість, енергоефективність	Інтегральна оцінка придатності ядра 5G неможлива без системних показників

Це означає, що одна й та сама метрика може мати різний рівень внеску в інтегральну оцінку залежно від доменної специфіки ІКС. Наприклад, для окремих транзакційних сервісів втрата пакетів може мати другорядне значення порівняно із затримкою, тоді як для телеметричних систем саме втрата повідомлень може бути визначальним показником якості. Аналогічно модульність є критично важливою для довготривалих хмарних сервісів із регулярними оновленнями, але може мати менший внесок для компонентів зі стабільною функціональною роллю. Отже, вибір вагових коефіцієнтів і пріоритетів метрик має здійснюватися не абстрактно, а з урахуванням предметної області, архітектурних особливостей системи та умов її експлуатації.

З цього випливає важливий методичний висновок: універсальність системи оцінювання досягається не через однаковість ваг чи наборів метрик для всіх ІКС, а через однаковість правил їх відбору, нормалізації та інтерпретації. Подальша модель оцінювання має бути універсальною на рівні структури, але профільованою на рівні наповнення та практичного трактування результатів.

Такий підхід також дозволяє уникнути методичної суперечності між міждоменністю комплексної моделі та спеціалізацією доменного методу для 5G Core: перша задає загальні правила оцінювання, а другий конкретизує склад і вагу показників відповідно до архітектури та експлуатаційних сценаріїв конкретного класу ІКС.

Отже, сформований метричний апарат слід трактувати як керовану систему, що допускає доменне профілювання. Для комплексної моделі це забезпечує порівнюваність між різними класами ІКС, а для доменного методу 5G Core – обґрунтований вибір показників, пов’язаних з архітектурою та експлуатаційними сценаріями ядра 5G.

Для підвищення прикладної інтерпретованості динамічних метрик доцільно доповнювати нормалізовану оцінку порівнянням із зовнішніми вимогами до передавання критичних повідомлень. Такий підхід використано в дослідженні вимог до VoIP, ATM та ATN/IPS, де показники затримки, джиттера, втрат пакетів і якості голосу зіставляються з гранично допустимими значеннями. Зокрема, для сигналів управління наземна затримка не повинна перевищувати 100 мс, а для передавання голосових пакетів наземними компонентами – 130 мс; додатково враховуються обмеження джитера не більше 30 мс, втрата пакетів менше 1 % та MOS не нижче 4,0 [52].

Зазначений підхід може використовуватись як зовнішній контрольний контур для інтерпретації отриманих результатів. Це дозволяє встановити, чи є зафіксовані значення динамічних метрик прийнятними не лише відносно інших сценаріїв експерименту, а й відносно прикладних вимог до передавання повідомлень у критичних мережевих сервісах.

Для показників-дестимуляторів, зменшення яких відповідає покращенню якості, коефіцієнт відповідності вимогам може бути поданий як:

$$k_i^{(-)} = \frac{x_i}{x_i^{lim}}, \qquad k_i^{(-)} \leq 1, \tag{2.8}$$

де x_i – отримане експериментальне значення і-ї метрики, x_i^{lim}– гранично допустиме значення цієї метрики, $k_i^{(-)}$ – коефіцієнт відповідності для показника-дестимулятора.

Для показників-стимуляторів, збільшення яких відповідає покращенню якості, використовується обернене відношення мінімально необхідного значення до отриманого експериментального значення:

$$k_i^{(+)} = \frac{x_i^{req}}{x_i}, \qquad k_i^{(+)} \leq 1. \tag{2.9}$$

Отже, значення $k \leq 1$ свідчить про відповідність вимозі, тоді як $k > 1$ вказує на перевищення допустимого рівня або недостатність отриманого показника. Така процедура особливо корисна для затримки, джитера, втрати пакетів, пропускної здатності і MOS, оскільки ці метрики мають безпосередню інженерну інтерпретацію.

Конкретизація контрольних меж і цільових значень для доменних показників 5G Core подається у підрозділі 3.3, де формалізується доменно-орієнтований метод оцінювання якості ПЗ ядра 5G.

Висновки до другого розділу

У розділі систематизовано статичні та динамічні метрики оцінювання якості ПЗ в ІКС і обґрунтовано доцільність їх спільного використання. Показано, що статичні метрики характеризують продуктову складову якості та формують передумови належного функціонування системи, тоді як динамічні метрики відображають фактичну поведінку ПЗ в умовах експлуатації.

Сформовано базовий набір статичних метрик, що охоплює функціональну повноту, контроль доступу, модульність, складність та адаптивність, а також

набір динамічних метрик, до якого включено затримку, пропускну здатність, втрати пакетів, показники надійності, відновлюваності та масштабованості. Встановлено, що між статичними й динамічними метриками існують причинно-наслідкові зв’язки, які можуть мати як підсилювальний, так і компромісний характер.

Обґрунтовано процедуру формування узгодженого набору метрик на основі моделі ISO/IEC 25010, логіки Goal–Question–Metric та критеріїв релевантності, вимірюваності, інтерпретованості, відтворюваності й придатності до нормалізації. Визначено методичні засади підготовки показників до подальшої інтеграції: встановлення напряму оптимізації, вибір джерел даних, нормалізація, зважування та доменне профілювання.

Додатково обґрунтовано, що вибір метрик визначається архітектурою програмного засобу, вимогами, сценаріями функціонування, інструментальною спостережуваністю та доменом застосування. На прикладі free5GC показано, що профіль 5G Core має поєднувати базові міждоменні метрики з показниками, пов’язаними з контрольною та користувацькою площинами, сервісною взаємодією мережевих функцій і масштабуванням навантаження [4; 49–51; 59].

Також розглянуто зовнішній контур інтерпретації динамічних результатів через порівняння з вимогами до передачі критичних повідомлень, що дозволяє пов’язати отримані значення затримки, втрати пакетів, джитера або MOS з інженерними критеріями прийнятності [52].

Отже, другий розділ формує метричну основу для побудови комплексної моделі оцінювання якості ПЗ в ІКС. Він не вводить завершену модель інтегральної оцінки, а визначає склад, призначення та правила використання метрик, які надалі формалізуються у третьому розділі під час розроблення моделі та методу оцінювання.

РОЗДІЛ 3
МОДЕЛЬ ТА МЕТОД ОЦІНЮВАННЯ ЯКОСТІ ПЗ В ІКС НА ОСНОВІ СТАТИЧНИХ І ДИНАМІЧНИХ МЕТРИК

ІКС характеризуються високою складністю архітектур, розподіленістю компонентів, інтенсивною взаємодією сервісів через мережу та залежністю ключових показників функціонування від умов експлуатації. За таких умов забезпечення якості ПЗ не може обмежуватися лише статичним оцінюванням властивостей програмного продукту, оскільки значуща частина вимог до якості проявляється саме під час виконання у конкретному контексті використання.

Спираючись на результати попередніх розділів, у цьому розділі розробляються комплексна модель і доменно-орієнтований метод оцінювання якості ПЗ в ІКС на основі інтеграції статичних і динамічних метрик. Основна ідея полягає у формуванні узагальненого інтегрального показника якості, який відображає, з одного боку, відповідність програмного продукту вимогам і характеристикам моделі ISO/IEC 25010, а з іншого – фактичну поведінку ПЗ за умов змінного навантаження, мережевих впливів та розподіленого розгортання [1–3; 14; 17; 72].

Послідовність викладу передбачає, що спочатку формулюються вимоги до моделі та методу оцінювання, далі розробляється комплексна модель інтегральної оцінки якості ПЗ в ІКС як загальна теоретико-методична основа, а поряд із цим пропонується доменно-орієнтований метод оцінки якості ПЗ ядра 5G як самостійний прикладний результат, адаптований до специфіки телекомунікаційного середовища нового покоління.

3.1 Вимоги до моделі та методу оцінки якості ПЗ в ІКС

Розробка моделі оцінювання якості ПЗ в ІКС має спиратися на системні властивості таких систем та на виявлені у першому розділі обмеження існуючих підходів. Ключовою проблемою є те, що традиційні моделі якості здебільшого

описують характеристики програмного продукту, але не забезпечують достатньо гнучкого інтегрування експлуатаційних показників, які визначають якість сервісу в реальному середовищі.

З урахуванням цього до моделі та методу оцінювання якості ПЗ в ІКС висуваються такі базові вимоги: комплексність оцінки; сумісність зі стандартами та відтворюваність; порівнюваність різнорідних метрик; контекстно-орієнтованість і доменна адаптивність; адаптивність до деградації та ризик-орієнтованість; придатність до автоматизації.

Комплексність означає одночасне врахування статичних властивостей ПЗ як продукту та динамічних властивостей, що проявляються у виконанні: затримка, пропускна здатність, втрата пакетів, стабільність, доступність та реакція на деградацію мережі або ресурсів. Сумісність зі стандартами передбачає узгодженість із сімейством SQuaRE, насамперед з ISO/IEC 25010 як референтною моделлю характеристик якості, та використання формалізованих метрик ISO/IEC 25022 і ISO/IEC 25023 або їх нормованих еквівалентів [1–3; 45; 64].

Контекстно-орієнтованість означає можливість налаштування набору метрик, вагових коефіцієнтів і порогових значень залежно від класу ІКС, типу сервісу та режиму використання. Для критичних режимів експлуатації модель має бути здатною підсилювати роль динамічної складової, оскільки саме вона безпосередньо відображає ризик порушення SLA або деградації сервісу. Нарешті, придатність до автоматизації вимагає, щоб метод був реалізований у вигляді відтворюваної процедури збору, нормалізації, зважування, агрегування та інтерпретації показників якості [24–26; 43; 63].

У таблиці 3.1 наведено основні вимоги до моделі та методу оцінювання якості ПЗ в ІКС, що визначають їхню придатність для інтеграції статичних і динамічних метрик, урахування доменної специфіки та отримання відтворюваної інтегральної оцінки.

Таблиця 3.1

Вимоги до моделі та методу оцінювання якості ПЗ в ІКС

Вимога	Зміст вимоги	Практичне значення для ІКС
Комплексність оцінки	Поєднання статичних і динамічних метрик в інтегральному показнику	Дає змогу одночасно оцінювати якість продукту і якість сервісу
Сумісність зі SQuaRE	Опора на ISO/IEC 25010, 25022, 25023	Забезпечує наукову коректність і відтворюваність
Нормалізація показників	Приведення різнорідних метрик до єдиної шкали [0;1]	Уможливлює агрегацію та порівняння показників
Контекстно-орієнтованість	Налаштування набору метрик і ваг залежно від типу ІКС	Дозволяє адаптувати оцінювання до 5G, IoT, SDN/NFV та інших доменів
Адаптивність до деградації	Механізм зміни ваг за перевищення критичних порогів	Підвищує чутливість оцінки до порушення SLA та деградації сервісів
Придатність до автоматизації	Інтеграція з моніторингом, тестовими стендами, CI/CD	Підтримує безперервний контроль якості та експериментальні дослідження
Діагностичність і трасованість	Можливість переходу від інтегрального показника до часткових індексів, окремих метрик і джерел даних	Дозволяє пояснювати причини деградації якості та обґрунтовувати технічні рішення
Стійкість інтерпретації	Однакові правила нормалізації, зважування та порогової інтерпретації для однакових умов оцінювання	Забезпечує відтворюваність результатів і зменшує суб’єктивність оцінки

Сформульовані вимоги визначають рамку подальшої розробки комплексної моделі та методу оцінювання. З одного боку, вони забезпечують

зв’язок із загальноприйнятими стандартами якості ПЗ, а з іншого – дозволяють розширити ці підходи доменно-специфічними показниками, релевантними для сучасних ІКС.

Окремої уваги заслуговує вимога діагностичності моделі. Для практичного використання інтегрального показника недостатньо, щоб він лише ранжував альтернативи або фіксував загальний рівень якості. Необхідно, щоб структура моделі дозволяла переходити від інтегральної оцінки до часткових рівнів і конкретних метрик, які сформували негативний внесок. Інакше модель буде зручною для презентації результатів, але малокорисною для технічного вдосконалення ПЗ. У роботі ця вимога реалізується через поділ на статичну й динамічну складові та через можливість додаткового ієрархічного розгортання показників.

Не менш важливою є вимога до стійкості інтерпретації. Модель повинна працювати таким чином, щоб за однакових вхідних умов і однаково визначених вагових коефіцієнтів отримувався однаковий результат незалежно від виконавця оцінювання. Це означає потребу в максимально формалізованих правилах нормалізації, визначення порогів, трактування типів метрик та побудови вагових схем. Саме тому у подальших підрозділах математичний апарат моделі та методу описується у вигляді чітких співвідношень, а не лише на рівні словесного пояснення.

Вимога до автоматизації також має подвійний зміст. З одного боку, вона стосується можливості автоматичного збору динамічних метрик із систем моніторингу. З іншого – можливості повторюваного застосування моделі в циклі релізів, регресійних перевірок та експлуатаційного контролю. Таким чином, автоматизація розглядається не як допоміжна опція, а як важлива умова практичної релевантності моделі оцінювання для сучасних ІКС.

3.2 Комплексна модель оцінки якості ПЗ в ІКС

У сучасних ІКС, що функціонують в умовах високої інтенсивності трафіку, розподіленої архітектури та змінних навантажень, забезпечення належної якості ПЗ є критично важливим. Якість ПЗ безпосередньо впливає на такі параметри, як надійність передачі даних, затримка, пропускна здатність, доступність сервісів та масштабованість – а саме на ключові показники ефективності ІКС.

З огляду на сформульовану проблему та виявлені обмеження існуючих підходів, у роботі запропоновано комплексну модель оцінки якості ПЗ в ІКС, яка поєднує: (1) статичні характеристики якості згідно з моделлю ISO/IEC 25010, що кількісно оцінюються за допомогою відповідних метрик сімейства SQuaRE; (2) набір динамічних операційних мір якості, узгоджених насамперед із характеристиками ефективності функціонування та надійності: затримку, пропускну здатність, втрати пакетів, доступність, відновлюваність, масштабованість і стійкість поведінки в умовах обмежених ресурсів [1–3; 14; 17; 72].

Модель побудована за модульним принципом і передбачає багаторівневу оцінку якості: базовий рівень, на якому виконується первинна оцінка за класичними статичними метриками; динамічний рівень, де здійснюється моніторинг поведінкових показників ПЗ у контрольованому середовищі; та агрегований рівень, на якому розраховується зважений інтегральний індекс якості на основі нормованих статичних і динамічних показників.

Сутність запропонованої моделі полягає в тому, що вона поєднує дві площини оцінювання, які в традиційних підходах часто існують окремо. Продуктова площина відповідає на питання, наскільки коректно, керовано та безпечно побудоване ПЗ як програмний продукт. Експлуатаційна площина відповідає на питання, наскільки ефективно ця реалізація функціонує в умовах конкретної ІКС. Об’єднання цих площин у єдиному індексі дозволяє подолати розрив між «формально якісним» і «операційно придатним» ПЗ.

Модель має модульний характер не лише у структурному, а й у методичному сенсі. Це означає, що окремі групи метрик можуть уточнюватися, розширюватися або профілюватися під домен, не руйнуючи загальної логіки оцінювання. Така властивість є принципово важливою для ІКС, оскільки системи різного призначення – від 5G Core до IoT-платформ і сервісів мережевого керування – потребують різних наборів динамічних показників при збереженні спільної рамки оцінки [58; 72–73].

Крім того, модель орієнтована на використання в задачах порівняння альтернатив. У реальних умовах це може стосуватися порівняння різних версій одного програмного компонента, різних конфігурацій розгортання, альтернативних реалізацій сервісної функції або різних профілів експлуатації. Саме можливість такого порівняння є однією з причин, чому інтегральний індекс якості будується на основі нормованих і зважених метрик, а не лише на основі описової характеристики стану системи [24–26; 63; 72].

На рисунку 3.1 наведено комплексну багаторівневу модель інтегрального оцінювання якості ПЗ в ІКС, що відображає поєднання статичних і динамічних метрик, їх нормалізацію, зважування та агрегування в інтегральний показник якості.

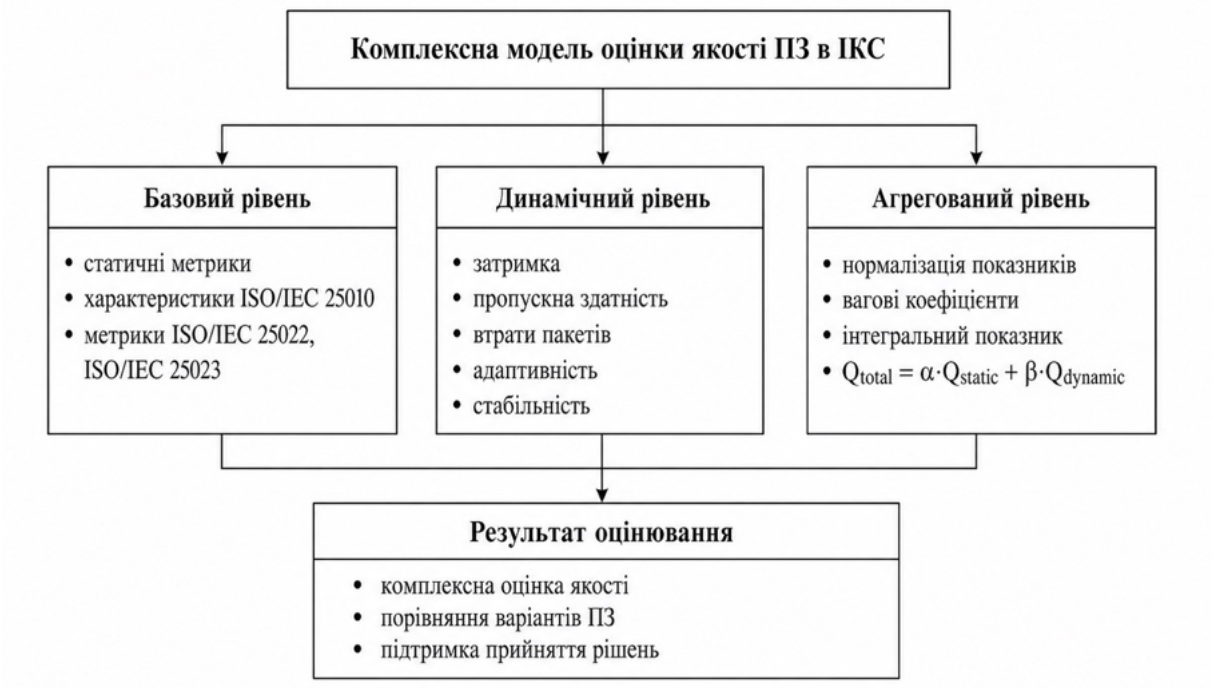

Рис. 3.1. Комплексна багаторівнева модель інтегральної оцінки якості ПЗ в ІКС

3.2.1 Загальний підхід до моделювання

Метричний апарат, сформований у другому розділі, у цьому підрозділі використовується як вихідна основа для математичної формалізації комплексної оцінки. На відміну від попереднього розділу, де визначено склад і правила підготовки показників, далі подано процедури їх нормалізації, зважування та інтегрування у часткові й загальний індекси якості.

Окремі положення комплексної моделі, доменного методу для ядра 5G та використання QoS-орієнтованих підходів у телекомунікаційних сценаріях були апробовані в попередніх публікаціях здобувача [14–15; 17; 30; 43; 72; 74–77]. У дисертаційній роботі ці положення узагальнюються та розвиваються в межах цілісного методичного апарату оцінювання якості ПЗ в ІКС.

Інтегральна оцінка якості ПЗ Q_{total} розраховується на основі двох основних груп метрик: статичних і динамічних. Статичні метрики формують показник Q_{static}, який відображає внутрішні властивості програмного продукту, а динамічні – показник $Q_{dynamic}$, що характеризує поведінку ПЗ під час експлуатації .

У базовому вигляді інтегральна оцінка визначається співвідношенням: $Q_{total} = \alpha \cdot Q_{\text{static}} + \beta \cdot Q_{\text{dynamic}}$, де α та β – вагові коефіцієнти, що визначають внесок продуктової та експлуатаційної складових у загальну оцінку якості, α + β = 1. Така модель є основою для комплексного оцінювання та може бути деталізована ієрархічним поданням часткових рівнів або профілів експлуатації.

Уведення двох вагових коефіцієнтів α та β має не лише технічне, а й методичне значення. Воно відображає тезу, що різні класи ІКС можуть вимагати різного балансу між продуктовою та експлуатаційною якістю. Для компонентів, які працюють у критичних режимах і мають жорсткі обмеження SLA, динамічна складова може бути вагомішою. Для компонентів, у яких основним ризиком є складність супроводу та безпеки, більшу роль може відігравати статична складова [24–26; 43; 72].

Таким чином, запропонований підхід до моделювання можна визначити як адаптивно-інтегральний: він зберігає сталу математичну структуру, але допускає зміну профілю пріоритетів відповідно до контексту застосування.

3.2.2 Формалізація статичних метрик

Нехай $\{s_i\}, \mathrm{i} = 1..\mathrm{n}$, – множина статичних метрик, нормалізованих у межах [0;1]. Тоді статична складова якості визначається як зважена сума:

$$Q_{static} = \sum_{i=1}^{n} w_i \cdot s_i, \qquad \sum_{i=1}^{n} w_i = 1, \tag{3.1}$$

де w_i – ваговий коефіцієнт для кожної метрики, визначений експертно або на основі аналізу ризиків.

Наприклад:

– s_1 – нормалізоване значення метрики функціонального покриття для підхарактеристики функціональна повнота;

– s_2 – нормалізоване значення метрики керованості доступу для підхарактеристики конфіденційність;

– s_3 – нормалізоване значення метрики зчеплення компонентів для підхарактеристики модульність;

– s_4 – нормалізоване значення метрики адаптивності до апаратного середовища для підхарактеристики адаптивність.

У контексті ІКС до статичних метрик доцільно відносити, зокрема, функціональне покриття, керованість доступу, модульність та адаптивність до апаратного середовища [1–3; 53; 62; 72].

При формалізації статичної складової принципово важливим є уникнення дублювання інформації між близькими за змістом метриками. Якщо дві метрики описують одну й ту саму властивість, їх одночасне включення до Q_{static} призводить до перекосу інтегральної оцінки. Саме тому базовий набір статичних метрик у роботі обмежено тими показниками, які відображають різні сторони

продуктової якості: повноту реалізації, захищеність доступу, керованість архітектури, складність супроводу та адаптивність.

Ще одним важливим аспектом є інтерпретація низького значення Q_{static}. Воно не завжди означає негайну непридатність системи до роботи, але свідчить про підвищений ризик того, що під час модернізації, масштабування або зміни середовища експлуатації система проявить нестійкість, надмірні витрати супроводу або проблеми безпеки. У такому сенсі статична складова в моделі виконує функцію раннього попередження.

У таблиці 3.2 узагальнено приклад набору статичних метрик для комплексної моделі оцінювання якості ПЗ в ІКС.

Таблиця 3.2

Приклад набору статичних метрик для комплексної моделі оцінки якості ПЗ в ІКС

Характеристика	Підхарактеристика	Метрика	Позначення	Примітка
Функціональна придатність	Функціональна повнота	Функціональне покриття	FC_p	Частка реалізованих функцій
Безпека	Конфіденційність	Керованість доступу	AC	Частка захищених ресурсів / операцій
Супроводжуваність	Модульність	Нормалізована метрика модульності	M	Оцінює зчеплення та керованість архітектури
Переносимість	Адаптивність	Адаптивність до середовища	P_{AD}	Частка підтримуваних середовищ розгортання

3.2.3 Формалізація динамічних метрик

Нехай $\{d_j\}, j = 1..m,$ – множина динамічних метрик, нормалізованих у межах [0;1]. Тоді динамічна складова якості визначається як

$$Q_{dynamic} = \sum_{j=1}^{m} v_j \cdot d'_j, \qquad \sum_{j=1}^{m} v_j = 1, \tag{3.2}$$

де d'_j $^{d'_i}$ – нормалізоване значення метрики j-го типу, v_j – вага кожної динамічної метрики.

Для показників типу “менше – краще” (затримка, втрати, час відновлення) нормалізація здійснюється у формі інверсії, а для показників типу “більше – краще” (пропускна здатність, масштабованість, MTBF) – у прямій формі.

Для затримки (менше – краще):

$$d'_1 = 1 - \frac{d_1 - d_{min}}{d_{max} - d_{min}}. \tag{3.3}$$

Для пропускної здатності (більше – краще):

$$d'_2 = \frac{d_2 - d_{min}}{d_{max} - d_{min}}. \tag{3.4}$$

Для втрат (менше – краще):

$$d'_3 = 1 - \frac{d_3 - d_{min}}{d_{max} - d_{min}}. \tag{3.5}$$

Це дозволяє зберегти єдиний напрям інтерпретації, коли більше нормалізоване значення відповідає кращій якості.

Використання нормалізованих динамічних метрик дає змогу розглядати їх у межах єдиної аналітичної мови, однак при цьому важливо зберігати змістовне трактування кожного показника.

Наприклад, однакове зниження нормалізованого значення для затримки та пропускної здатності не обов’язково означає однаковий рівень ризику: у певних ІКС збільшення затримки є критичнішим, ніж помірне зменшення пропускної здатності. Звідси випливає потреба у ваговому профілюванні динамічної складової [43; 60–61; 72].

Крім того, динамічна складова є природним носієм часової інформації, зокрема дозволяє оцінювати не лише «рівень якості», а й тенденцію її зміни. Саме ця властивість робить її ключовою для механізму адаптивного коригування ваг, який надалі використовується в методі оцінювання.

У таблиці 3.3 узагальнено приклад набору динамічних метрик для комплексної моделі оцінювання якості ПЗ в ІКС, що відображають поведінку ПЗ під час функціонування в умовах навантаження, мережевих впливів та експлуатаційних змін.

Таблиця 3.3

Приклад набору динамічних метрик для комплексної моделі оцінки якості ПЗ в ІКС

Група	Метрика	Позначення	Напрям оптимізації	Призначення
Ефективність функціонування	Середня затримка	L_{avg}	Менше – краще	Часова ефективність обробки запитів
	Пропускна здатність	T	Більше – краще	Спроможність системи обробляти потік операцій
Мережева стійкість	Втрати пакетів	P_{loss}	Менше – краще	Оцінка деградації передавання
Надійність	Середній час безвідмовної роботи	MTBF	Більше – краще	Стійкість сервісу до відмов
Відновлюваність	Середній час відновлення	MTTR	Менше – краще	Швидкість відновлення працездатності

3.2.4 Загальний інтегральний індекс

Підставляючи обидві складові до базової моделі, отримаємо узагальнений інтегральний індекс якості. Його значення належить інтервалу [0;1] і може використовуватися для порівняння різних компонентів, сценаріїв навантаження або версій ПЗ.

$$Q_{total} = \alpha \cdot (\sum_{i=1}^{n} w_i \cdot s_i) + \beta \cdot (\sum_{j=1}^{m} v_j \cdot d'_j) \quad (3.6)$$

За необхідності базова модель може бути розширена ієрархічною агрегацією, що підвищує діагностичність результатів.

Практична перевага інтегрального індексу полягає у можливості швидкого зіставлення альтернатив без втрати доступу до детальної інформації. На рівні управлінського рішення Q_{total} дозволяє ранжувати варіанти або фіксувати загальний стан системи, тоді як на аналітичному рівні може бути розгорнутий до часткових індексів і окремих метрик. Саме поєднання узагальнення та розгортання забезпечує придатність моделі як для дослідницького аналізу, так і для експлуатаційної практики.

Це особливо важливо для порівняння різних класів ІКС, де абсолютні значення окремих показників можуть бути непорівнюваними, але нормований інтегральний індекс дозволяє встановити відносну якість різних реалізацій.

3.2.5 Практичний приклад розрахунку інтегральної оцінки якості ПЗ

Для ілюстрації розглянемо приклад застосування моделі для оцінки програмного компонента типу SDN-контролера, що використовується в ІКС. Нехай на основі статичних метрик, наведених у таблиці 3.2, отримано

$$Q_{static} = 0{,}7825 \tag{3.7}$$

а за результатами динамічних вимірювань, наведених у таблиці 3.3

$$Q_{dynamic} = 0{,}5722 \tag{3.8}$$

Якщо для даної системи ваги складових вибрано як α = 0,6 та β = 0,4, то інтегральна оцінка якості становить

$$Q_{total} = 0{,}6 \cdot 0{,}7825 + 0{,}4 \cdot 0{,}5722 = 0{,}6984 \tag{3.9}$$

Отримане значення свідчить про задовільний рівень якості, однак вказує на необхідність удосконалення динамічної поведінки компонента в умовах підвищеного навантаження. Саме така інтерпретація є цінною для практичного застосування моделі, оскільки дозволяє виявити не лише рівень якості в цілому, але й джерело її деградації.

На рисунку 3.2 подано візуалізацію нормалізованих значень статичних і динамічних метрик, що використовуються для оцінювання якості ПЗ в ІКС.

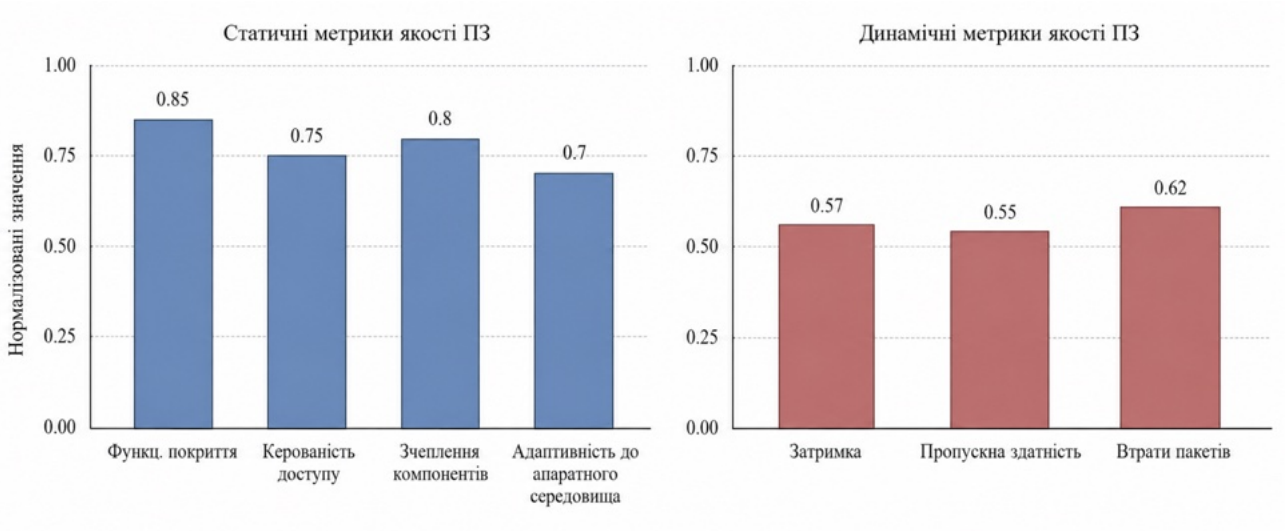

Рис. 3.2. Візуалізація нормалізованих значень метрик якості ПЗ – окремо для статичних і динамічних метрик

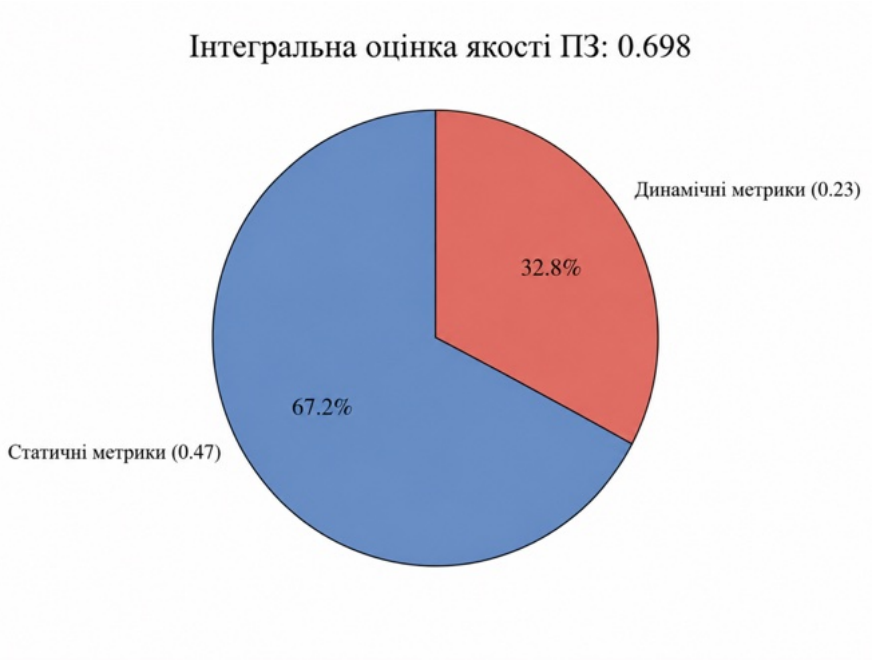

Рис. 3.3. Інтегральна оцінка якості ПЗ

На рисунку 3.3 подано кругову діаграму, що відображає внесок статичних і динамічних метрик у загальну інтегральну оцінку якості ПЗ. Така візуалізація дає змогу наочно представити структуру інтегрального показника та обґрунтувати необхідність одночасного врахування обох груп метрик.

Поданий приклад має не лише ілюстративний, а й методичний характер. Він показує, що навіть за досить високого значення Q_{static} інтегральна оцінка може знижуватися через погіршення динамічної поведінки під навантаженням.

Це підтверджує одну з центральних тез роботи: для ІКС формально добра продуктова якість не гарантує прийнятного рівня сервісної якості в реальному середовищі

Крім того, приклад демонструє, що структура інтегральної оцінки дозволяє одразу визначити напрям технічного втручання. Якщо статична складова є відносно високою, а динамічна – суттєво нижчою, то першочерговими стають оптимізація навантажувального профілю, масштабування, оптимізація мережевої взаємодії або архітектурних вузьких місць. Якщо ж обидві складові є низькими, потрібне більш глибоке переглядання як самої реалізації, так і умов її функціонування.

3.3 Доменний метод оцінки якості ПЗ ядра 5G

Окремим прикладним результатом є метод оцінки якості ПЗ ядра 5G. Вибір цього домену зумовлений тим, що 5G Core є високонавантаженою сервіс-орієнтованою системою, для якої критичними є не лише традиційні характеристики якості, але й латентність сигналізації, масштабованість, стійкість до збоїв, інтеграція з NFV/SDN-інфраструктурою та енергоефективність [4; 30; 43; 49–51; 74–77].

Первинну апробацію положень доменно-орієнтованого методу для ПЗ ядра 5G здійснено у працях здобувача [30; 74]; у дисертації ці положення систематизовано, формалізовано та пов’язано з комплексною моделлю оцінювання якості ПЗ в ІКС.

Метод оцінювання якості ПЗ ядра 5G спирається на спільний із комплексною моделлю метричний апарат, однак не є її послідовним етапом. Основною ідеєю є адаптація моделі ISO/IEC 25010 до специфіки архітектури 5G Core та доповнення традиційних характеристик якості доменно-специфічними показниками, релевантними для телекомунікаційних систем нового покоління. Це дозволяє побудувати трирівневу архітектуру методу, що зберігає сумісність зі стандартами, але водночас враховує специфіку 5G.

На рисунку 3.4 подано узагальнену архітектуру методу оцінювання якості ПЗ ядра 5G, що відображає основні рівні методу.

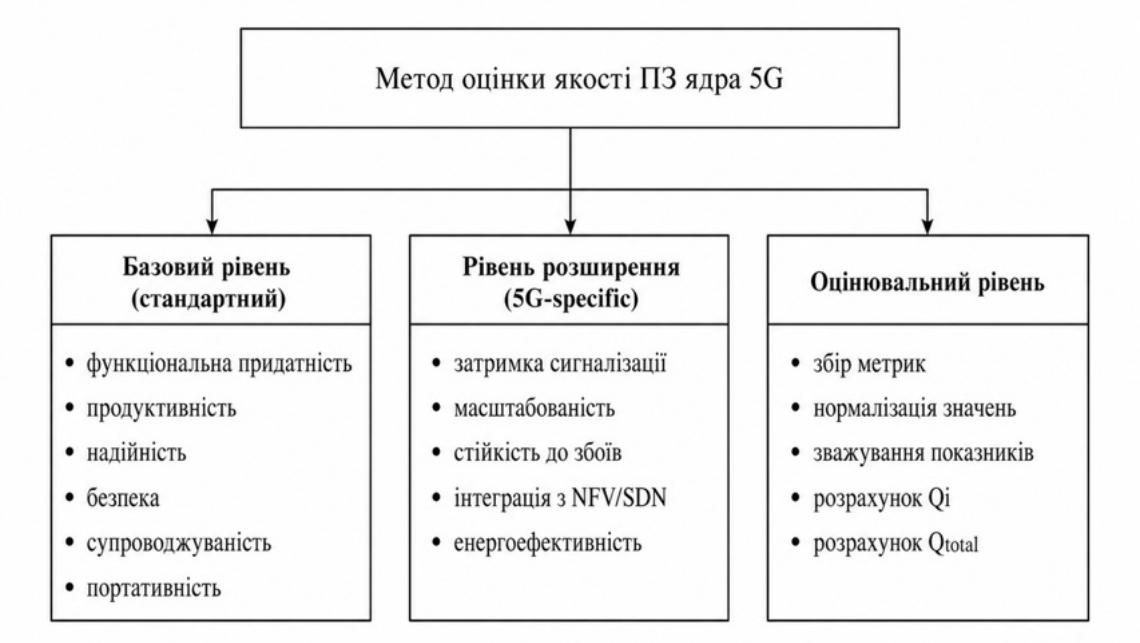

Рис. 3.4. Архітектура методу оцінки якості ПЗ ядра 5G

Метод складається з трьох основних:

1. Базовий рівень (стандартний) – традиційні характеристики ISO/IEC 25010: функціональна придатність (Functional suitability), ефективність функціонування (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:

$$Q_i = \sum_{j=1}^{n} w_{ij} \cdot m_{ij} \qquad (3.10)$$

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

Загальний показник якості ПЗ ядра розраховується як зважена сума характеристик:

$$Q_{total} = \sum_{i=1}^{k} W_i \cdot Q_i \tag{3.11}$$

Для 5G Core доменна специфіка методу полягає в тому, що якість повинна оцінюватися не лише на рівні окремого сервісу, а й на рівні системної взаємодії функцій AMF, SMF, UPF, PCF, AUSF та суміжних компонентів. Помірне відхилення показників окремої функції може не бути критичним саме по собі, однак у сукупності з навантаженням на інші функції воно змінює характер сигналізації, маршрутизації та ресурсного керування. Це зумовлює потребу у трирівневій організації методу, де поєднуються стандартні характеристики якості, 5G-специфічні параметри та механізм інтеграції отриманих оцінок.

Ще одним важливим аспектом є можливість використання методу в циклі релізів телекомунікаційного ПЗ. У реальному середовищі оператор або розробник зацікавлений не стільки в абстрактній оцінці якості, скільки в порівнянні версій, конфігурацій розгортання та профілів навантаження. Саме тому запропонований метод орієнтований на поєднання автоматизованого збирання метрик, нормалізації, інтегральної оцінки та подальшої інтерпретації результату як підстави для рішення про прийнятність релізу.

На відміну від суто стандартної оцінки, доменний метод для 5G Core дозволяє виокремити параметри, без яких неможливо об’єктивно оцінити придатність ПЗ до експлуатації в мережі нового покоління: латентність сигналізації, відмовостійкість, масштабованість у пікових сценаріях, сумісність із NFV/SDN та енергоефективність. Саме включення цих показників і становить основний прикладний зміст запропонованого методу [4; 30; 43; 49–51; 74; 76–77].

Зазначений перелік характеристик утворює повний простір оцінювання якості ПЗ ядра 5G. Практичне застосування методу може передбачати формування сценарних підмножин із цього простору залежно від мети оцінювання, типу досліджуваного компонента, режиму функціонування системи та доступних джерел даних. Такий підхід дає змогу застосовувати метод як для комплексної оцінки ядра 5G загалом, так і для цільового аналізу окремих аспектів його функціонування без необхідності одночасного вимірювання всіх можливих показників.

У таблиці 3.4 наведено зіставлення типових функцій 5G Core з найбільш релевантними групами метрик, що дає змогу обґрунтувати вибір показників для доменно-орієнтованого оцінювання якості ПЗ ядра 5G.

Таблиця 3.4

Типові функції 5G Core та найбільш релевантні для них групи метрик

Функція / компонент	Найбільш критичні показники	Причина включення до методу
AMF	латентність сигналізації, відмовостійкість	визначає швидкість і стійкість керування доступом та мобільністю
SMF	масштабованість, час реакції на зміну стану сесій	впливає на стійкість керування сесіями за пікових навантажень
UPF	пропускна здатність, втрата пакетів, енергоефективність	визначає фактичну якість обробки користувацького трафіку
PCF / AUSF	надійність, затримка політик і автентифікації	критичні для стійкої роботи політик і процедур доступу
інтеграція з NFV/SDN	адаптивність, сумісність, час переналаштування	характеризує придатність до хмарно-розподіленого середовища

3.3.1 Математичний опис методу

Запропонований метод оцінювання визначається як формалізована процедура, що встановлює послідовність дій від вибору набору метрик і ваг до обчислення інтегральної оцінки та її інтерпретації в різних режимах

експлуатації. Метод орієнтований на відтворюваність і можливість автоматизації, що робить його придатним для інтеграції в практики контролю якості релізів, моніторингу та експериментальних досліджень.

Етап 1. Визначення набору метрик.

Оцінювання виконується за доменним профілем показників, який охоплює шість взаємопов'язаних груп: процедурну працездатність і масштабованість 5G Core, часові характеристики сигналізаційних процедур, якість площини користувача, доступність мережевих функцій, ресурсну ефективність та стійкість до контрольованих відмов. Така структура дає змогу не зводити оцінку лише до факту реєстрації UE або встановлення PDU-сесії, а відобразити сукупність операційних проявів якості ПЗ ядра 5G.

Цей профіль не дублює загальну систему метрик розділу 2, а конкретизує її для телекомунікаційного домену. Його призначення полягає у відборі саме тих показників, які безпосередньо впливають на працездатність, масштабованість і сервісну якість ПЗ ядра 5G.

Практичне застосування методу передбачає формування сценарної підмножини показників із повного доменного профілю. Склад такої підмножини визначається метою оцінювання, типом досліджуваного компонента, режимом функціонування системи та доступними джерелами експериментальних або моніторингових даних. Це дає змогу застосовувати метод як для комплексної оцінки 5G Core загалом, так і для цільової перевірки окремих аспектів його функціонування без необхідності одночасного вимірювання всіх можливих метрик.

При цьому повний доменно-орієнтований показник якості доцільно розглядати як ієрархічний індекс: часткові групи метрик спочатку нормалізуються та агрегуються в групові компоненти, а далі об'єднуються в інтегральний показник. Якщо для окремого сценарію вимірюється лише частина профілю, результат такого сценарію трактується як часткова реалізація методу, тоді як повний індекс формується за наявності всіх визначених груп показників.

Для забезпечення відтворюваної інтерпретації результатів у межах доменного методу доцільно задати контрольні межі, цільові значення та напрям оптимізації для ключових показників 5G Core.

У таблиці 3.5 наведено контрольні межі та правила інтерпретації доменних метрик, що використовуються для оцінювання якості ПЗ ядра 5G і забезпечують зіставлення фактичних значень показників із допустимими параметрами функціонування.

Таблиця 3.5

Контрольні межі та правила інтерпретації доменних метрик методу оцінки якості ПЗ ядра 5G

Доменна група / показник	Позначення або спосіб вимірювання	Контрольне / цільове значення	Напрям інтерпретації та роль у методі
Процедурна успішність реєстрації	$R_{reg} = \frac{N_{reg}^{OK}}{N_{UE}}$	цільове значення – 1,0; зменшення свідчить про деградацію процедур доступу	більше – краще; використовується для сервісного рівня Q_1
Процедурна успішність PDU-сесії	$R_{pdu} = \frac{N_{pdu}^{OK}}{N_{UE}}$	цільове значення – 1,0; зменшення відображає втрату здатності формувати користувацькі сесії	більше – краще; використовується для сервісного та функціонального рівнів
Формування площини користувача	$R_{tun} = \frac{N_{tun}^{OK}}{N_{pdu}^{OK}}$	цільове значення – 1,0; відхилення означає неповне створення тунелів площини користувача	більше – краще; характеризує фактичну працездатність площини користувача
Затримка сигналізаційних процедур	T_{reg}, T_{pdu} за часовими мітками UE-логів	оцінюється відносно базового сценарію або SLA-профілю; зростання часу є ознакою деградації	менше – краще; використовується для аналізу часової ефективності 5G Core
Повторні спрацювання таймера T3580	N_{T3580} за UE-логами	цільове значення – 0; збільшення кількості повторів свідчить про проблеми встановлення PDU Session	менше – краще; підвищує чутливість методу до прихованої деградації

Доменна група / показник	Позначення або спосіб вимірювання	Контрольне / цільове значення	Напрям інтерпретації та роль у методі
Затримка площини користувача	RTT для створених TUN-інтерфейсів	контрольна межа для критичних повідомлень – до 100 мс; додаткова межа для сервісів реального часу – до 130 мс	менше – краще; використовується для перевірки прийнятності параметрів площини користувача
Jitter / mdev	mdev або джитер за результатами ICMP/мережевих вимірювань	не більше 30 мс	менше – краще; характеризує стабільність часових параметрів передавання
Втрата пакетів	Втрата пакетів, %	менше 1 %	менше – краще; використовується як контроль допустимості втрат у мережевому сценарії
Пропускна здатність площини користувача	Пропускна здатність TCP, Мбіт/с	оцінюється відносно базового сценарію або очікуваного профілю навантаження	більше – краще; доповнює оцінку фактичної якості площини к
Доступність мережевих функцій	$A_{NF} = \frac{N_{active}}{N_{total}}$	цільове значення – 1,0	більше – краще; використовується для інфраструктурного рівня Q_3
Ресурсна ефективність	CPU/RAM на одну успішну PDU-сесії	оцінюється відносно базового сценарію; пряме енергоспоживання у межах стенда не вимірюється	менше – краще; використовується як непряма ресурсна оцінка енергоефективності
Відмовостійкість	успішність відновлення після контрольованого перезавантаження SMF / збереження користувацької площини]	цільове значення – 1,0 для контрольованого сценарію	більше – краще; відображає стійкість ПЗ ядра 5G до керованих відмов

Наведені межі не підміняють повного SLA оператора, а задають методичні правила інтерпретації для експериментальної перевірки доменного методу. У четвертому розділі вони використовуються для зіставлення фактичних

показників площини користувача із допустимими межами та для пояснення причин зміни інтегрального доменно-орієнтованого показника.

Позначимо набір усіх часткових метрик як:

$$M = \{m_1, m_2, \dots, m_n\}, \qquad m_i \in [0; 1]. \tag{3.12}$$

Етап 2. Нормалізація метрик.

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

$$\widehat{m}_i = \frac{m_i - m_i^{min}}{m_i^{max} - m_i^{min}}, \tag{3.13}$$

де $\widehat{m}_i$ – нормалізоване значення, m_i^{min}, m_i^{max} – межі варіації показника, відповідно мінімальне та максимальне значення показника, визначені за результатами вимірювання, еталонними межами або вимогами експлуатаційного профілю.

Етап 3. Зважування метрик.

Для врахування значущості різних показників застосовується система вагових коефіцієнтів:

$$w_i \in [0; 1], \sum_{i=1}^{n} w_i = 1. \tag{3.14}$$

Етап 4. Обчислення агрегованих індексів для кожного рівня.

Сервісний рівень (Q_1):

$$Q_1 = \sum_{i=1}^{k} w_i^{(1)} \cdot \widehat{m}_i. \tag{3.15}$$

Функціональний рівень (Q_2):

$$Q_2 = \sum_{j=1}^{l} w_j^{(1)} \cdot \widehat{m}_j. \tag{3.16}$$

Інфраструктурний рівень (Q_3):

$$Q_3 = \sum_{z=1}^{p} w_z^{(3)} \cdot \widehat{m}_z. \tag{3.17}$$

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

Етап 5. Розрахунок інтегрального індексу якості.

$$Q_{total} = a \cdot Q_1 + \beta \cdot Q_2 + \gamma \cdot Q_3, \quad (3.18)$$

де $\alpha+\beta+\gamma=1$, коефіцієнти α, β, γ визначають важливість рівнів (напр., $\alpha = 0,4, \beta = 0,35, \gamma = 0,25$). Значення цих коефіцієнтів визначаються залежно від критичності сценарію експлуатації та доменного профілю 5G Core.

Етап 6. Динамічна оцінка.

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

$$Q_{total}(t) = f\big(m_1(t), m_2(t), \dots, m_n(t)\big), \quad (3.19)$$

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.

Адаптивне коригування ваг не змінює змісту метрик, а лише уточнює їх внесок у підсумкову оцінку залежно від критичності сценарію. Таке коригування має виконуватися за попередньо визначеними правилами або профілем оцінювання, а не шляхом довільної зміни ваг після отримання результатів.



Рис. 3.5. Алгоритм адаптивного коригування вагових коефіцієнтів

На рисунку 3.5 подано алгоритм адаптивного коригування вагових коефіцієнтів, що забезпечує зміну пріоритетності статичних і динамічних метрик залежно від умов функціонування ІКС та виявлених ознак деградації.

У таблиці 3.6 узагальнено послідовність реалізації методу оцінювання якості ПЗ ядра 5G, що охоплює етапи вибору доменних метрик, їх нормалізації, зважування, агрегування та інтерпретації отриманих результатів.

Таблиця 3.6

Послідовність реалізації методу оцінки якості ПЗ ядра 5G

Етап	Зміст етапу	Результат
1. Формування контексту	Визначення об’єкта оцінювання, сценаріїв навантаження, вимог SLA та переліку метрик	Профіль оцінювання
2. Збір показників	Отримання значень статичних і динамічних метрик із тестів, моніторингу, логів	Масив первинних даних
3. Нормалізація	Приведення різнорідних метрик до шкали [0;1] з урахуванням напряму оптимізації	Нормалізовані метрики
4. Зважування та агрегація	Обчислення часткових індексів рівнів і загального індексу якості	Q_1, Q_2, Q_3, Q_{total}
5. Адаптивна корекція	Зміна ваг при перевищенні критичних порогів затримки, втрат чи інших показників	Підвищення чутливості оцінки до деградації
6. Інтерпретація результатів	Порівняння профілів, виявлення джерел деградації, прийняття рішень	Рекомендації щодо якості релізу / сервісу

Запропонований метод не суперечить міжнародним стандартам, а розширює їх у частині комплексного та контекстно-орієнтованого використання для ІКС. Його сильна сторона полягає у можливості одночасно оцінити продуктову якість ПЗ та реальну якість сервісу, а також у здатності адаптувати вагові коефіцієнти до критичних режимів експлуатації.

Математичний опис методу доцільно розглядати як формалізацію послідовності «вибір – нормалізація – агрегування – інтерпретація – адаптація». Саме в такій послідовності метод може бути повторно застосований до різних профілів навантаження, різних версій ПЗ або різних інсталяцій 5G Core. Це

забезпечує важливу для практики властивість відтворюваності, тобто можливість отримувати порівнювані результати за однаково визначених умов.

Саме така послідовність забезпечує відповідність між результатами дослідження, наведеними в публікаціях [30; 72; 74], та формальним апаратом дисертаційного дослідження: комплексна модель задає загальну структуру інтегральної оцінки, а доменний метод конкретизує її для ПЗ ядра 5G.

Адаптивний етап має принципове значення, оскільки саме він забезпечує чутливість інтегральної оцінки до критичних відхилень динамічних показників. За статичного механізму зважування система може недостатньо швидко реагувати на різке погіршення затримки або зростання втрати пакетів. Адаптивна зміна ваг дозволяє посилити внесок тих показників, які в конкретному сценарії мають найбільший вплив на ризик порушення сервісу.

Щоб уникнути довільності, адаптивне коригування доцільно задавати як попередньо визначену функцію відхилення показника від допустимого порогу. Наприклад, для критичного показника k його вага може збільшуватися лише тоді, коли нормоване значення або фактичне відхилення перевищує встановлену межу ризику; після коригування всі ваги повторно нормуються так, щоб їх сума дорівнювала одиниці.

Метод може бути розширений і на інші сервіси, подібні за архітектурою до 5G Core, якщо для них зберігається трирівнева логіка оцінювання: базові стандартизовані характеристики, доменно-специфічні показники та інтегральний механізм інтерпретації. Це свідчить, що запропоноване рішення має не лише прикладне, а й методологічне значення.

Для практичної інтеграції в процеси забезпечення якості важливо, що модель і метод можуть бути використані як на етапі передрелізного контролю, так і в післярелізному моніторингу. У передрелізному циклі основний акцент робиться на порівнянні версій, визначенні прийнятності релізу та фіксації потенційних ризиків. У післярелізному циклі – на контролі фактичної деградації, адаптивному коригуванні ваг і накопиченні бази знань про поведінку

компонентів у різних режимах. Така подвійна логіка застосування підсилює прикладну цінність запропонованих рішень.

З погляду керування якістю важливо, що запропонована модель допускає побудову порогової інтерпретації результатів. Це означає можливість визначати діапазони високої, задовільної та критичної якості залежно від інтегрального індексу та від часткових індексів. У реальних сценаріях така інтерпретація полегшує ухвалення рішень щодо масштабування, відкочування релізу, зміни конфігурації чи переходу до детальнішого діагностичного аналізу.

Ще одним важливим наслідком є можливість формування історичних профілів якості. Якщо інтегральна оцінка та її складові накопичуються в часі, то модель починає виконувати не лише функцію поточного оцінювання, а й функцію аналітики тенденцій. Для ІКС це надзвичайно важливо, оскільки деградація якості часто має не миттєвий, а поступовий характер і пов’язана із накопиченням змін у конфігурації, залежностях або навантаженні.

Таким чином, результати третього розділу формують завершену методичну основу, у якій аналітичні висновки першого розділу та система метрик другого розділу набувають форми операційно придатного інструментарію оцінювання. Саме це і створює передумови для переконливої експериментальної перевірки у четвертому розділі.

Важливо також, що модель і метод допускають поетапне впровадження. На початковому етапі організація може використовувати лише базову схему $Q_{static} - Q_{dynamic}$ для кількох критичних компонентів. На наступному етапі можливе розширення набору метрик, уточнення вагових схем, підключення адаптивного коригування і формування історичних профілів якості. Така поетапність підвищує шанси реального впровадження одержаних результатів, оскільки не вимагає одномоментного створення надскладної системи моніторингу та аналітики.

З методичного погляду це означає, що запропонована система оцінювання є масштабованою не лише щодо об’єктів дослідження, а й щодо ступеня власної

складності. Саме така властивість є бажаною для ІКС, де еволюція сервісів, інфраструктури та вимог до якості є безперервною.

3.4 Практичні аспекти інтеграції моделі та методу у процеси забезпечення якості ПЗ

Результати, отримані у третьому розділі, доцільно розглядати не лише як формальні математичні побудови, а й як основу для створення керованого циклу оцінювання якості ПЗ в ІКС. У практиці забезпечення якості такий цикл може включати п’ять взаємопов’язаних дій: специфікацію профілю якості для конкретного класу системи; збирання статичних і динамічних показників; обчислення інтегральної оцінки; аналіз причин відхилення; прийняття технічних рішень щодо релізу, модернізації або масштабування. Саме можливість підтримати весь цей цикл відрізняє запропоновані модель і метод від підходів, які обмежуються лише описовою фіксацією характеристик якості.

У практичному контексті результати оцінювання якості ПЗ можуть використовуватися не лише для технічного моніторингу та прийняття рішень щодо релізу, модернізації або масштабування, а й для організаційно-технічної підтримки процесів кібербезпеки, зокрема в системах інформаційного супроводу, реагування та підтримки прийняття рішень [31].

У системах із безперервною інтеграцією та доставкою особливе значення має те, що оцінювання повинно бути повторюваним і автоматизованим. Для статичних метрик це означає інтеграцію зі статичним аналізом коду, перевіркою покриття вимог, аналізом конфігурацій та автоматизованою верифікацією політик доступу [65–68; 78–79]. Для динамічних метрик – інтеграцію з навантажувальними тестами, системами моніторингу та сценаріями контрольованої емуляції мережевих умов. Запропонована у роботі логіка Q_{static} – $Q_{dynamic}$ – Q_{total} дозволяє використовувати результати цих інструментів у межах єдиної системи прийняття рішень [63; 72].

Застосування моделі в циклі релізів може мати кілька рівнів зрілості. На базовому рівні інтегральний показник використовується як індикатор прийнятності конкретної версії сервісу. На розширеному рівні оцінювання проводиться для кількох профілів навантаження, що дозволяє виявляти деградацію якості при пікових режимах. На просунутому рівні формується історія інтегральних оцінок за релізами й профілями, на основі якої стає можливим не тільки виявлення поточних проблем, а й прогнозування тенденцій зміни якості.

Для експлуатаційних підрозділів корисним є те, що часткові складові інтегральної оцінки можуть бути пов’язані з конкретними класами рішень. Низьке значення Q_{static} є сигналом до рефакторингу, перегляду архітектурних залежностей, доопрацювання механізмів контролю доступу чи документації розгортання. Низьке значення $Q_{dynamic}$ за стабільного Q_{static} є підставою для оптимізації налаштувань, масштабування, перегляду профілю навантаження або усунення інфраструктурних вузьких місць. Отже, модель має не лише аналітичне, а й безпосередньо управлінське значення.

Для доменного методу 5G Core ця логіка набуває ще більшої ваги, оскільки оцінювання якості тут може бути використане для порівняння альтернативних реалізацій функцій ядра, а також для зіставлення різних конфігурацій NFV/SDN-інфраструктури та сценаріїв мережевих зрізів [80]. У такому випадку інтегральна оцінка не замінює деталізованих технічних метрик, але виконує роль узагальненого критерію, який дозволяє швидко зіставляти варіанти та виявляти ті з них, що потребують поглибленого аналізу.

Ще одним прикладним аспектом є зв’язок моделі з практиками управління ризиками. У роботі показано, що адаптивне коригування вагових коефіцієнтів дає змогу підсилювати внесок критичних динамічних показників у тих сценаріях, де ризик деградації сервісу є найбільшим. Це означає, що запропонований підхід може використовуватися не лише як інструмент післяфактум-оцінювання, а і як елемент системи попередження порушень SLA,

що особливо важливо для телекомунікаційних і сервісно-критичних ІКС [43; 70; 74; 77; 79].

Впровадження підходу на практиці також передбачає організаційний компонент. Необхідно визначити відповідальність за підтримку профілів метрик, за оновлення вагових коефіцієнтів, за перегляд порогових значень і за інтерпретацію інтегральних оцінок. Отже, запропонована система оцінювання є не лише технічним артефактом, а і частиною ширшого процесу управління якістю ПЗ в ІКС, де ролі аналітиків, розробників, інженерів з експлуатації та фахівців із безпеки мають бути узгоджені між собою.

Таким чином, практична інтеграція моделі та методу в процеси забезпечення якості ПЗ показує, що запропоновані рішення можуть використовуватися на різних рівнях – від локального аналізу релізу до організації безперервного циклу контролю якості й раннього виявлення ризиків деградації сервісу.

З практичного погляду це означає, що запропоновану модель доцільно впроваджувати не як разовий розрахунок, а як повторювану процедуру контролю якості. Її результат має фіксувати не тільки числове значення Q_{total} або Q_{DOM}, а й профіль оцінювання, перелік використаних метрик, вагові коефіцієнти, пороги та сценарій експлуатації.

У таблиці 3.7 узагальнено варіанти практичного використання інтегральної моделі оцінювання якості ПЗ в ІКС, зокрема для контролю якості, виявлення деградації, порівняння конфігурацій, підтримки прийняття рішень та інтеграції процедур оцінювання в процеси забезпечення якості.

Таблиця 3.7

Варіанти використання інтегральної моделі оцінювання якості ПЗ в ІКС у практиці забезпечення якості

Контекст застосування	Як використовується модель	Очікуваний результат
передрелізний контроль	порівняння Q_{static}, $Q_{dynamic}$ і Q_{total} для нової версії	рішення про прийнятність релізу
навантажувальні випробування	порівняння профілів деградації за різних сценаріїв	виявлення вузьких місць і стійкості під навантаженням

Контекст застосування	Як використовується модель	Очікуваний результат
експлуатаційний моніторинг	періодичне або безперервне оновлення динамічної складової	раннє виявлення погіршення якості сервісу
архітектурне удосконалення	зіставлення низьких значень інтегральної оцінки з проблемними статичними метриками	обґрунтування рефакторингу або зміни конфігурації
керування ризиками	адаптивне підсилення внеску критичних показників	оперативне реагування на ризик порушення SLA

Висновки до третього розділу

У третьому розділі сформульовано вимоги до моделі та методу оцінювання якості ПЗ в ІКС, зокрема комплексність, сумісність зі стандартами SQuaRE, нормування різнорідних показників, контекстно-орієнтованість, адаптивність до деградації та придатність до автоматизації.

Запропоновано комплексну модель інтегральної оцінки якості ПЗ в ІКС, що поєднує статичну та динамічну складові через зважене агрегування нормованих метрик і дозволяє отримати узагальнений показник $Q_{total} \in [0; 1]$. Модель виступає загальною методичною основою для оцінювання якості ПЗ у різних класах ІКС.

Окремим результатом запропоновано доменно-орієнтований метод оцінки якості ПЗ ядра 5G з трирівневою архітектурою: базовий рівень, рівень розширення та оцінювальний рівень. Уточнено математичний апарат моделі й методу, наведено приклади формалізації статичних і динамічних метрик, приклад розрахунку інтегральної оцінки та алгоритм адаптивного коригування вагових коефіцієнтів. Це створює безпосередню методичну основу для експериментальної перевірки розробленого підходу у четвертому розділі.

Додатково слід підкреслити, що розроблені у розділі модель і метод не дублюють один одного, а виконують різні функції в межах загальної методики дослідження. Комплексна модель забезпечує загальну рамку інтеграції статичних і динамічних показників для різних класів ІКС, тоді як доменно-

орієнтований метод конкретизує цю логіку для ПЗ ядра 5G. Саме таке розмежування забезпечує одночасно узагальнюваність і прикладну релевантність отриманих результатів.

Положення комплексної моделі інтегрального оцінювання якості ПЗ в ІКС узгоджуються з результатами дослідження щодо комплексної моделі з урахуванням динамічних параметрів [72] та розвивають їх у напрямі формалізованого поєднання статичної й динамічної складових.

РОЗДІЛ 4
ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ПЕРЕВІРКА КОМПЛЕКСНОЇ МОДЕЛІ ТА ДОМЕННОГО МЕТОДУ ОЦІНКИ ЯКОСТІ ПЗ В ІКС

У третьому розділі дослідження сформульовано два самостійні наукові результати, що спираються на спільний метричний апарат, але не є послідовними етапами одного й того самого дослідження. Першим результатом є доменно-орієнтований метод оцінки якості ПЗ ядра 5G, другим – комплексна багаторівнева модель інтегральної оцінки якості ПЗ в ІКС. Обидва результати використовують поєднання статичних і динамічних метрик, однак мають різні об’єкти валідації, різні експериментальні середовища та різні критерії інтерпретації отриманих результатів.

З огляду на це четвертий розділ побудовано не за логікою «від методу до моделі» чи навпаки, а як опис двох незалежних серій експериментальної перевірки. У першій серії перевіряється придатність методу оцінки якості ПЗ ядра 5G до аналізу специфічних вимог телекомунікаційного середовища нового покоління. У другій серії перевіряється комплексна модель оцінки якості ПЗ в ІКС у віртуалізованому середовищі з контрольованою емуляцією мережевих параметрів і навантаження.

Метою цього розділу є експериментальне підтвердження працездатності, чутливості та практичної придатності як запропонованого методу, так і комплексної моделі оцінки якості ПЗ. Для цього уточнюються об’єкти дослідження, умови та сценарії проведення експериментів, подаються кількісні результати і виконується їх інтерпретація в контексті дослідження.

Методично важливо, що експериментальний розділ орієнтований не лише на демонстрацію окремих числових результатів, а й на перевірку чотирьох властивостей запропонованих рішень: відтворюваності, чутливості, діагностичності та практичної придатності. Відтворюваність означає можливість повторення сценаріїв з подібним результатом; чутливість – здатність фіксувати зміну якості при варіації навантаження; діагностичність – можливість

встановлювати джерела деградації; практична придатність – можливість використання результатів у прийнятті технічних рішень щодо релізів, конфігурацій та масштабування.

4.1 Опис об’єктів експериментального дослідження

Об’єктами експериментальної перевірки є метод оцінки якості ПЗ ядра 5G, апробований у спеціалізованому середовищі free5GC з емуляцією користувацького навантаження за допомогою UERANSIM, а також комплексна модель оцінки якості ПЗ в ІКС, що перевіряється у віртуалізованому середовищі Proxmox VE на прикладі трьох типових програмних компонентів: SDN-контролера, мікросервісу автентифікації та IoT-компонента [30; 49–51; 72].

Для уникнення змішування результатів ці дві експериментальні серії розглядаються окремо. Експерименти для 5G-методу орієнтовані на порівняння доменного підходу з універсальними моделями оцінювання якості. Експерименти для комплексної моделі орієнтовані на перевірку чутливості інтегральної оцінки до зміни навантаження та мережевих умов у різних класах ПЗ для ІКС.

У таблиці 4.1 наведено основні напрями експериментальної перевірки, що охоплюють валідацію доменно-орієнтованого методу оцінювання якості ПЗ ядра 5G та комплексної моделі оцінювання якості ПЗ в ІКС.

Таблиця 4.1

Напрями експериментальної перевірки

Напрям експерименту	Об’єкт перевірки	Експериментальне середовище	Основна мета
Серія А	Метод оцінки якості ПЗ ядра 5G	free5GC + UERANSIM + Docker	Порівняти доменно-орієнтований метод з альтернативними підходами та перевірити його чутливість до 5G-специфічних факторів
Серія Б	Комплексна модель оцінки якості ПЗ в ІКС	Proxmox VE + NetEm + Prometheus / Grafana	Перевірити чутливість інтегральної оцінки до зміни навантаження і мережевих умов для різних типів ПЗ

Валідація комплексної моделі здійснюється у стенді на базі Proxmox VE. У межах цього стенда налаштовано п’ять віртуальних машин із чітко визначеними ролями: RouterVM, SDN VM, Auth VM, IoT VM та Monitoring VM. RouterVM використовується для емуляції мережевих умов за допомогою NetEm; SDN VM містить OpenDaylight; Auth VM реалізує мікросервіс автентифікації на Spring Boot; IoT VM – сервіс збору телеметрії на Node.js з MQTT; Monitoring VM – підсистему збору й візуалізації метрик на базі Prometheus і Grafana.

Вибір двох різних експериментальних середовищ має принципове значення для проведення дослідження. Якщо обмежитися лише 5G-стендом, результати могли б бути інтерпретовані як вузько телекомунікаційні. Якщо обмежитися лише середовищем Proxmox VE з типовими сервісними компонентами, залишилася б неперевіреною доменна релевантність методу для 5G Core. Саме тому у роботі використано паралельну логіку валідації, яка дозволяє показати і загальність, і прикладну спрямованість запропонованих рішень.

Окремо слід наголосити на репрезентативності обраних компонентів стенда Proxmox VE. SDN-контролер репрезентує мережеву функцію керування з високою чутливістю до затримки та стабільності API-взаємодії; мікросервіс автентифікації репрезентує транзакційний сервіс із поєднанням вимог до швидкодії та безпеки; IoT-компонент репрезентує подієво-потокову систему, для якої критичними є стійкість до втрат і масштабованість. Саме завдяки цій різнорідності можна перевірити, що модель є придатною не для одного окремого сценарію, а для кількох типів ПЗ у межах ІКС.

У таблиці 4.2 наведено критерії репрезентативності обраних об’єктів експериментального дослідження.

Таблиця 4.2

Критерії репрезентативності обраних об’єктів експериментального дослідження

Об’єкт	Який клас ІКС репрезентує	Чому є показовим для валідації
free5GC / UERANSIM	ядро мережі 5G	дозволяє оцінити метод у домені з жорсткими вимогами до затримки і масштабованості

Об’єкт	Який клас ІКС репрезентує	Чому є показовим для валідації
OpenDaylight	мережеве керування / SDN	чутливий до API-взаємодії, затримок і стабільності керування
Auth VM	транзакційний сервіс безпеки	поєднує вимоги до швидкодії, безпеки та стійкості під навантаженням
IoT VM	подієво-телеметричний сервіс	дозволяє оцінити вплив втрат і пропускної здатності на якість

На рисунку 4.1 наведено архітектуру експериментального стенда для валідації комплексної моделі оцінювання якості ПЗ в ІКС, що відображає взаємодію тестованих програмних компонентів, мережевої інфраструктури, засобів емуляції мережевих впливів та інструментів моніторингу.

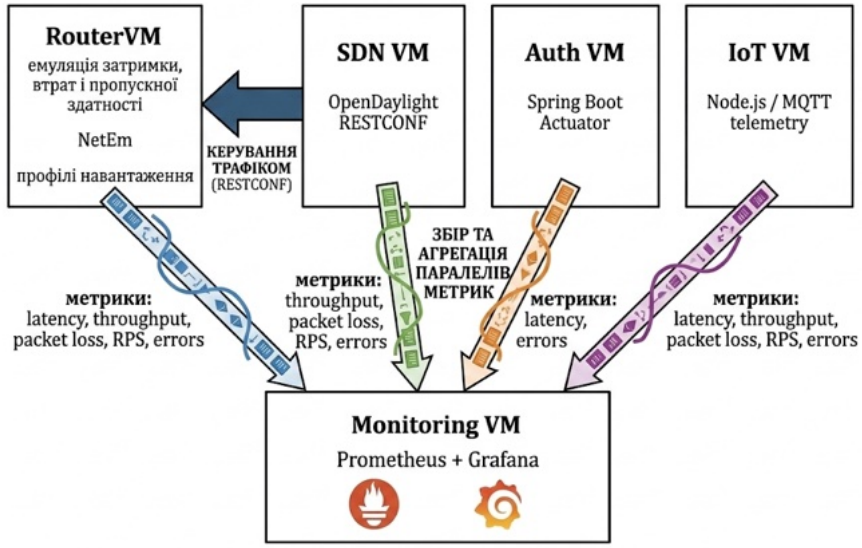

Рис. 4.1. Архітектура експериментального стенда для валідації комплексної моделі оцінки якості ПЗ в ІКС

Таблиця 4.3

Склад та функції компонентів стенда для перевірки комплексної моделі

Віртуальна машина	Основне ПЗ	Функція в експерименті	Основні вихідні метрики
RouterVM	Linux + NetEm	Емуляція затримки, втрат пакетів, обмеження пропускної здатності	профіль навантаження, втрата пакетів
SDN VM	OpenDaylight / Karaf	Контролер мережі, RESTCONF API	затримка, пропускна здатність

Віртуальна машина	Основне ПЗ	Функція в експерименті	Основні вихідні метрики
Auth VM	Spring Boot + Actuator	Мікросервіс автентифікації та авторизації	затримка, пропускна здатність, RPS
IoT VM	Node.js + MQTT + Mosquitto	Збір і передавання телеметрії	затримка, пропускна здатність
Monitoring VM	Prometheus + Grafana	Збір, агрегація та візуалізація показників	часові ряди, агреговані значення

У таблиці 4.3 наведено склад і функціональне призначення компонентів експериментального стенда, використаного для перевірки комплексної моделі оцінювання якості ПЗ в ІКС.

4.2 Методика проведення експериментів

Незважаючи на незалежність двох експериментальних серій, у їхній організації використано спільні методичні принципи: контрольованість сценаріїв, відтворюваність середовища, збір кількісних метрик, нормалізація показників та інтерпретація результатів через інтегральні оцінки або порівняльні характеристики. Загальна послідовність проведення експериментів включає визначення сценарію, налаштування середовища, збір значень статичних і динамічних метрик, їх нормалізацію та подальший аналіз.

У методиці проведення експериментів особливе значення надається контролю зовнішніх факторів, які можуть спотворювати результати: фонового навантаження на хостову інфраструктуру, несталості параметрів мережевої емуляції, різних інтервалів агрегації метрик і зміни стану суміжних сервісів. Для мінімізації цих впливів використано фіксовані профілі навантаження, однакові правила агрегації часових рядів, контроль повторюваності сценаріїв і зіставні процедури нормалізації [30; 71–72; 74].

Інтерпретація результатів ґрунтується не на одиничних пікових значеннях, а на узгоджених агрегованих показниках, що краще відображають загальну поведінку системи в межах заданого профілю. Це особливо важливо для ІКС, де

короткі стрибки навантаження можуть бути шумом, а не сталим проявом деградації. Тому акцент зроблено на поєднанні часових рядів і агрегованих оцінок.

На рисунку 4.2 подано структурну схему проведення експериментального дослідження, яка відображає послідовність підготовки середовища, збирання метрик, виконання експериментальних сценаріїв, оброблення результатів та їх подальшу інтерпретацію.



Рис. 4.2. Узагальнена послідовність проведення експериментального дослідження комплексної моделі оцінки якості ПЗ.

4.2.1 Методика перевірки доменного методу оцінки якості ПЗ ядра 5G

Перевірку доменно-орієнтованого методу побудовано як сукупність взаємопов’язаних експериментальних сценаріїв. Кожен сценарій спрямований на фіксацію окремої групи доменних характеристик ядра 5G: масштабованості, часових параметрів сигналізаційних процедур, якості площини користувача,

доступності мережевих функцій, ресурсної ефективності та стійкості до контрольованої відмови.

Для підсумкової інтерпретації використано результати запусків, для яких було перевірено коректність базової конфігурації стенда, наявність необхідних маршрутів і правил передавання трафіку, а також фактичну відповідність зібраних показників стану експериментального середовища. Це забезпечує відтворюваність розрахунків і коректність подальшої інтерпретації отриманих значень.

У таблиці 4.4 узагальнено сценарії експериментальної перевірки доменно-орієнтованого методу оцінювання якості ПЗ ядра 5G.

Таблиця 4.4

Сценарії експериментальної перевірки доменно-орієнтованого методу оцінки якості ПЗ ядра 5G

Сценарій	Група показників методу	Експериментальний спосіб перевірки	Вихідні метрики
A1	Масштабованість і процедурна працездатність	Запуск UERANSIM із контрольними точками 100, 300 та 500 UE	успішна реєстрація, успішне встановлення PDU-сесії, успішне формування TUN-інтерфейсу, T3580
A2	Затримка сигналізації	Аналіз часових міток у UE-логах	T_{reg}, T_{pdu}: середнє, медіана, мінімум, максимум
A3	Якість площини користувача	ICMP та TCP-вимірювання через репрезентативні TUN-інтерфейси	RTT, mdev/джитер, втрата пакетів, пропускна здатність TCP
A4	Доступність NF і ресурсна ефективність	Аналіз стану Docker-контейнерів та docker stats	A_NF, знімок стану CPU/RAM, ресурсна ціна сесії
A5	Відмовостійкість	Контрольований перезапуск SMF під час активного сценарію 500 UE	TUN після перезапуску, частка успішності площини користувача, максимальна кількість послідовних відмов

Методика фіксації показників A1 передбачала підрахунок успішних процедур початкової реєстрації і встановлення PDU-сесії за UE-логами, кількості створених TUN-інтерфейсів на стороні UERANSIM, а також кількості подій T3580 як індикатора повторних спроб встановлення PDU-сесії.

Нормовані показники A1:

$$R_{req} = \frac{N_{req}}{N_{UE}}, R_{pdu} = \frac{N_{pdu}}{N_{UE}}, R_{tun} = \frac{N_{tun}}{N_{UE}}, R_{T3580} = 1 - \min\left(\frac{N_{T3580}}{N_{UE}}, 1\right), \quad (4.1)$$

де N_{UE} – загальна кількість емуляційних UE у сценарії навантаження;

N_{req} – кількість UE, які успішно завершили процедуру процедуру початкової реєстрації;

N_{pdu} – кількість UE, для яких успішно встановлено PDU-сесії;

N_{tun} – кількість створених TUN-інтерфейсів;

N_{T3580} – кількість подій T3580, що відображають повторні спроби встановлення PDU-сесії через відсутність своєчасної відповіді від мережі;

R_{T3580} – нормований показник, який зменшується зі зростанням кількості таких подій.

Для сценарію A2 часові показники визначалися окремо для процедури реєстрації UE та процедури встановлення PDU-сесії. Узагальнено час виконання відповідної процедури визначався як різниця між часовою міткою її успішного завершення та часовою міткою початку:

$$T_{proc} = t_{req}^{success} - t_{req}^{start}, \quad (4.2)$$

де T_{proc} – тривалість виконання відповідної процедури, t_{proc}^{start} – часова мітка початку процедури, $t_{proc}^{success}$ – часова мітка її успішного завершення.

Для процедури реєстрації UE:

$$T_{req} = t_{req}^{success} - t_{req}^{start}, \quad (4.3)$$

де t_{req}^{start} – часова мітка події надсилання початкової реєстрації, $t_{req}^{success}$ – часова мітка успішного завершення процедури реєстрації UE.

Для процедури встановлення PDU-сесії:

$$T_{pdu} = t_{pdu}^{success} - t_{pdu}^{start}, \quad (4.4)$$

де t_{pdu}^{start} – часова мітка початку процедури встановлення PDU Session, $t_{pdu}^{success}$ – часова мітка успішного завершення процедури реєстрації успішного встановлення PDU-сесії.

Для A3 результати RTT, mdev/джитер та втрати пакетів зіставлялися з контрольними вимогами таблиці 3.5. При цьому ICMP RTT використовувався як контрольний показник площини користувача для вже створених TUN-інтерфейсів, а пропускна здатність TCP – як додаткова характеристика фактичної пропускної здатності площини користувача.

Для A4 доступність мережевих функцій оцінювалася за співвідношенням:

$$A_{NF} = \frac{N_{active}}{N_{total}}, \tag{4.5}$$

де N_{active}– кількість активних мережевих функцій, необхідних для сценарію, N_{total}– загальна кількість таких функцій.

Оскільки апаратне вимірювання енергоспоживання у стенді не виконувалося, енергоефективність інтерпретується опосередковано як ресурсна ефективність за CPU/RAM-навантаженням відносно кількості успішно встановлених PDU-сесії.

У сценарії A5 стійкість до відмови визначається через збереження наявних тунелів площини користувача і безперервність ICMP-доступності під час контрольованого перезапуску SMF:

$$R_{recovery} = \frac{N_{tun_after}}{N_{tun_before}}, \tag{4.6}$$

$$SR_{mon} = \frac{N_{ok}}{N_{checks}}, \tag{4.7}$$

$$F_{max} = \max\left(F_1, F_1, \dots F_q\right). \tag{4.8}$$

Для порівняння контрольних підходів і запропонованого доменно-орієнтованого методу використано три індекси: Q_{ISO}, Q_{MS} та Q_{DOM}. Показник Q_{ISO} – базовий стандартно-орієнтований контрольний індекс, що відображає успішність реєстрації UE; Q_{MS} – мікросервісно-орієнтований індекс, який додатково враховує встановлення PDU-сесії; Q_{DOM} – підсумковий доменно-

орієнтований показник, розрахований відповідно до етапів методу через агрегування сервісного, функціонального та інфраструктурного рівнів Q_1, Q_2 і Q_3. Таким чином, Q_{DOM} є результатом поетапної реалізації математичного опису методу.

$$Q_{ISO} = R_{req}, \tag{4.9}$$

$$Q_{MS} = 0{,}5 \cdot R_{req} + 0{,}5 \cdot R_{pdu}, \tag{4.10}$$

$$Q_{DOM} = 0{,}40 \cdot Q_1 + 0{,}35 \cdot Q_2 + 0{,}25 \cdot Q_3. \tag{4.11}$$

У межах експериментальної реалізації виконується групування отриманих показників за трьома рівнями, визначеними у розділі математичного опису: сервісним рівнем, функціональним рівнем та інфраструктурним рівнем.

До сервісного рівня віднесено показники реєстрації UE, встановлення PDU-сесії, події T3580 та часові характеристики сигналізаційних процедур; до функціонального рівня – формування TUN-інтерфейсів, RTT, втрати пакетів і пропускна здатність TCP; до інфраструктурного рівня – доступність мережевих функцій, ресурсні індикатори CPU/RAM та результат контрольованого перезапуску SMF.

4.2.2 Методика перевірки комплексної моделі оцінки якості ПЗ в ІКС

Перевірка комплексної моделі оцінювання якості ПЗ в ІКС здійснювалася як окрема експериментальна серія у віртуалізованому стенді на базі Proxmox VE. У межах цієї серії профілі 10 %, 50 % та 100 % інтерпретувалися як профілі керованої деградації мережевих умов, що задавалися на RouterVM засобами NetEm. Інтенсивність контрольного навантаження на досліджувані компоненти залишалася сталою, а змінними параметрами експерименту були мережева затримка та частка втрат пакетів.

Експериментальний стенд охоплював Monitoring VM, RouterVM з NetEm, VM із Auth-сервісом, VM з IoT-компонентом та MQTT-брокером, а також VM із SDN-компонентом на базі OpenDaylight. Така топологія забезпечувала проходження вимірювального трафіку від Monitoring VM до кожного

досліджуваного компонента через RouterVM, де керовано задавалися параметри мережевого середовища.

Для забезпечення коректності вимірювання затримки було застосовано підхід клієнтського вимірювання. Наскрізна затримка Auth-сервісу визначалася з боку Monitoring VM за допомогою auth-client-probe; затримка MQTT-взаємодії IoT-компонента – за допомогою iot-client-probe як двостороння затримка; затримка SDN-компонента – за допомогою sdn-client-probe шляхом виконання RESTCONF-запитів до OpenDaylight.

Перехід IoT-вимірювання до підходу двостороннього вимірювання усунув методичну похибку, пов’язану з можливою різницею системного часу між віртуальними машинами.

Пропускна здатність у серії Б має компонентно-орієнтований операційний зміст: для Auth-сервісу вона визначається як кількість HTTP-запитів за секунду під керованим навантаженням wrk; для IoT-компонента – як кількість успішно отриманих MQTT probe-повідомлень за секунду; для SDN-компонента – як кількість успішних RESTCONF-запитів за секунду. Такі величини використовуються для нормалізації всередині відповідного компонента, але не трактуються як пряме абсолютне зіставлення продуктивності різних класів ПЗ між собою.

Втрати пакетів у цій серії розглядаються як спільний параметр мережевого профілю NetEm, що впливає на всі три компоненти, а не як окремо незалежно виміряна втрата пакетів для кожного сервісу. Це дозволяє інтерпретувати зміну $Q_{dynamic}$ як реакцію комплексної моделі на контрольовану деградацію мережевого середовища.

Збір експериментальних даних виконувався засобами Prometheus, а візуалізація та агрегація результатів – у Grafana. Для кожного профілю було зафіксовано окремі часові вікна спостереження: для профілю 10 % – 20:47:12–20:57:12, для профілю 50 % – 20:59:23–21:09:23, для профілю 100 % – 21:11:34–21:21:34.

Під час інтерпретації результатів використовувалися середні значення метрик за відповідне часове вікно, а не узагальнені значення за весь період спостереження.

У таблиці 4.5 узагальнено профілі експериментальної деградації мережевих умов, що застосовувалися для перевірки чутливості комплексної моделі оцінювання якості ПЗ в ІКС до зміни затримки, втрати пакетів, джитера та пропускної здатності.

Таблиця 4.5

Профілі експериментальної деградації мережевих умов для перевірки комплексної моделі

Профіль, %	Характеристика експериментального режиму	Мережева затримка, мс	Втрати пакетів, %	Часове вікно спостереження
10	Базова керована деградація мережевих умов	5	0,1	20:47:12 – 20:57:12
50	Помірна керована деградація мережевих умов	15	0,8	20:59:23 – 21:09:23
100	Критична керована деградація мережевих умов	30	2,0	21:11:34 – 21:21:34

4.3 Експериментальна перевірка методу оцінки якості ПЗ ядра 5G

Експериментальна перевірка доменно-орієнтованого методу оцінки якості ПЗ ядра 5G виконана як послідовна реалізація етапів, наведених у математичному описі методу:

1. На першому етапі сформовано контекст оцінювання для стенда free5GC + UERANSIM і контрольних точок 100, 300 та 500 UE.

2. На другому етапі зібрано первинні показники з UE-логів, TUN-інтерфейсів, ICMP/TCP-вимірювань, Docker-стану мережевих функцій та сценарію контрольованого перезапуску SMF.

3. На третьому етапі показники нормалізовано до шкали [0;1].

4. На четвертому етапі розраховано агреговані індекси сервісного, функціонального та інфраструктурного рівнів.

5. На п’ятому етапі отримано інтегральний доменно-орієнтований показник якості,

6. На шостому – виконано інтерпретацію зміни якості за профілями навантаження.

Показник Q_{DOM} формується відповідно до етапів методу: після вибору й нормалізації метрик обчислюються агреговані індекси рівнів Q_1, Q_2 та Q_3, а вже після цього визначається інтегральна доменно-орієнтована оцінка. Такий порядок зберігає логіку етапу 4, наведену в математичному описі методу, і водночас дозволяє порівняти чутливість запропонованого підходу з простішими інтерпретаціями якості.

Значення Q_{ISO}, Q_{MS} та Q_{DOM} розраховано на основі нормованих показників, згрупованих відповідно до етапів методу: Q_{ISO}, і Q_{MS} використано як контрольні порівняльні індекси, а Q_{DOM} – як підсумковий доменно-орієнтований показник, сформований після обчислення агрегованих індексів рівнів Q_1, Q_2 та Q_3.

У таблиці 4.6 узагальнено результати навантажувальної перевірки методу оцінювання якості ПЗ ядра 5G, отримані для різних сценаріїв кількості UE та використані для аналізу зміни доменних показників якості за умов зростання навантаження.

Таблиця 4.6

Результати навантажувальної перевірки методу оцінки якості ПЗ ядра 5G

Кількість UE	Успішна реєстрація	Registration, %	Успішне встановлення PDU-сесії	PDU, %	Успішне формування TUN-інтерфейсу	TUN, %	T3580
100	100	100,0	100	100,0	100	100,0	2
300	266	88,7	257	85,7	257	85,7	90
500	383	76,6	372	74,4	372	74,4	334

За результатами фінальної обраної серії при 100 UE зафіксовано 100 успішних процедур початкової реєстрації, 100 успішних процедур PDU-сесії Establishment і 100 сформованих TUN-інтерфейсів. При 300 UE успішно завершено 266 процедур початкової реєстрації, 257 процедур встановлення PDU-сесії і сформовано 257 TUN-інтерфейсів. При 500 UE відповідні значення становили 383, 372 і 372. Отже, збільшення навантаження призводить до поступового зниження успішності процедур реєстрації та встановлення PDU-сесій, а також до зростання кількості повторних спроб, однак не спричиняє критичної деградації показників площини користувача для тих сесій, які були успішно встановлені.

На рисунку 4.3 подано графічне відображення залежності успішності процедур початкової реєстрації, встановлення PDU-сесії та створення TUN-інтерфейсів від кількості UE, що дає змогу оцінити вплив навантаження на процедурну стабільність ядра 5G.

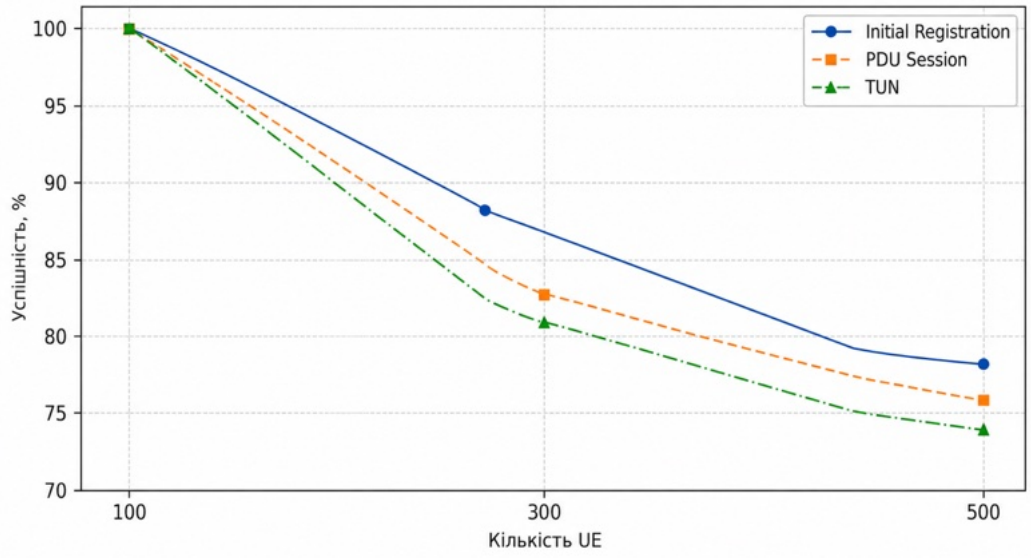

Рис. 4.3. Залежність успішності процедур початкової реєстрації, PDU-сесії та створення TUN-інтерфейсів від кількості UE

Динаміку деградації додатково підтверджує зростання кількості подій T3580: від 2 подій при 100 UE до 90 подій при 300 UE та 334 подій при 500 UE. Оскільки T3580 пов’язаний із повторними спробами встановлення PDU-сесії, цей показник використано не як самостійну помилку, а як часовий індикатор

перевантаження процедур площини керування і зниження стабільності сесійного керування.

На рисунку 4.4 подано графічне відображення залежності кількості подій T3580 від кількості UE, що дає змогу оцінити вплив зростання навантаження на повторні спроби встановлення PDU-сесій.

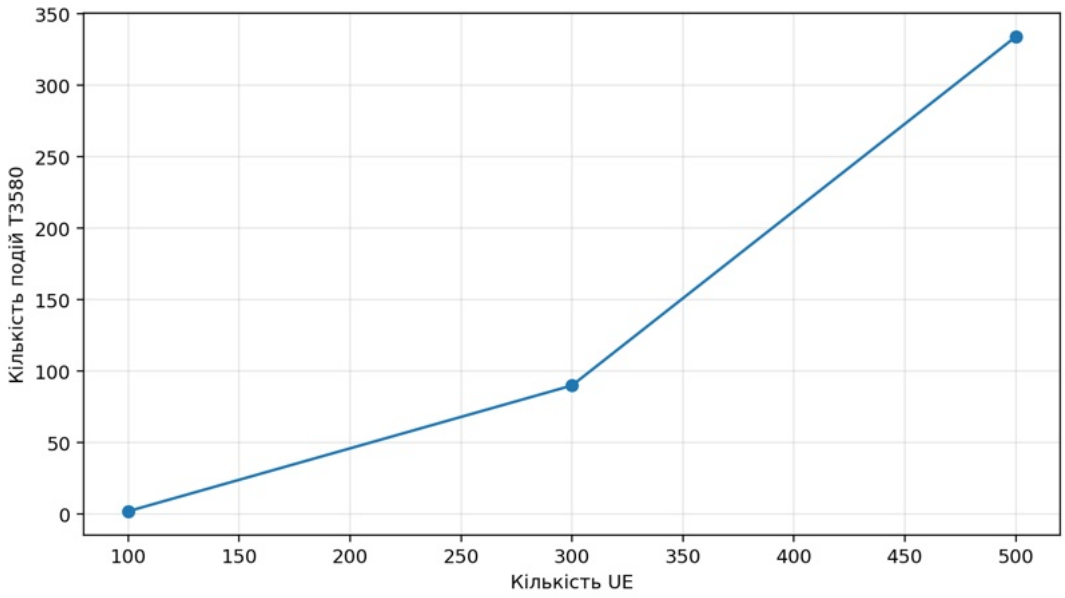

Рис. 4.4. Залежність кількості подій T3580 від кількості UE

У таблиці 4.7 узагальнено результати розрахунку доменно-орієнтованого показника якості ПЗ ядра 5G шляхом зіставлення контрольних індексів, агрегованих рівнів та підсумкового інтегрального значення.

Таблиця 4.7

Порівняння контрольних індексів Q_{ISO}, Q_{MS}, агрегованих рівнів $Q_1 - Q_3$ та підсумкового доменно-орієнтованого показника Q_{DOM}

UE	Q_{ISO}	Q_{MS}	Q_1 сервісний рівень	Q_2 функціональний рівень	Q_3 інфраструктурний рівень	Q_{DOM}
100	1,000	1,000	0,995	0,911	1,000	0,967
300	0,887	0,872	0,754	0,925	1,000	0,875
500	0,766	0,755	0,527	0,855	1,000	0,760

Для сервісного рівня враховано успішність реєстрації, встановлення PDU-сесії, події T3580 та часові характеристики сигналізаційних процедур. Для функціонального рівня враховано формування TUN-інтерфейсів, RTT, втрати пакетів і пропускна здатність TCP. Для інфраструктурного рівня використано показники доступності мережевих функцій, ресурсного стану стенда та стійкості до контрольованого перезапуску SMF. Інтегральний показник Q_{DOM} у цьому розрахунку є результатом етапу 5 і відображає не лише процедурну працездатність, а сукупну доменну оцінку якості ПЗ ядра 5G.

Для порівняльної інтерпретації у таблиці 4.7 поряд із Q_{DOM} подано два контрольні індекси. Q_{ISO} розглядається як базовий ISO/IEC 25010-орієнтований контрольний рівень, що відображає успішність реєстрації UE як прояв функціональної придатності. Q_{MS} є мікросервісно-орієнтованим індексом, який додатково враховує встановлення PDU-сесії і, відповідно, узгоджену роботу AMF, SMF, PCF та UPF. На відміну від них, Q_{DOM} формується відповідно до етапів методу та враховує сервісний, функціональний і інфраструктурний рівні оцінювання.

Отримані значення показують, що Q_{ISO} і Q_{MS} знижуються від 1,000 у режимі 100 UE до 0,766 та 0,755 у режимі 500 UE відповідно. Підсумковий доменно-орієнтований показник Q_{DOM}, розрахований через агреговані рівні Q_1, Q_2 та Q_3, змінюється від 0,967 при 100 UE до 0,875 при 300 UE та 0,760 при 500 UE. Така динаміка відображає поступове послаблення якості за зростання навантаження, причому інтерпретація Q_{DOM} ґрунтується не лише на факті успішної реєстрації UE, а й на сукупності процедурних і сигналізаційних показників, характеристик площини користувача та інфраструктурних параметрів функціонування ядра 5G.

Важливо, що перевага Q_{DOM} у цьому експерименті полягає не в більшому абсолютному падінні підсумкового числа порівняно з Q_{ISO} або Q_{MS}, а в діагностичній декомпозиції результату. Q_{ISO} і Q_{MS} показують сам факт деградації процедур, тоді як Q_{DOM} через рівні Q_1, Q_2 і Q_3 дозволяє встановити, що головний

внесок у погіршення якості зумовлений сервісним рівнем та процедурними характеристиками, а не повною втратою інфраструктурної доступності.

Отже, результати таблиці 4.7 підтверджують не лише чутливість методу до збільшення кількості UE, а й його здатність пояснювати природу деградації, що є принциповою відмінністю доменно-орієнтованого підходу від спрощених контрольних індексів.

Інфраструктурний рівень Q_3 у навантажувальній серії інтерпретується як системний сценарний індекс: у межах перевіреного стенда всі необхідні мережеві функції перебували у стані виконання, а контрольований перезапуск SMF не призвів до втрати активних тунелів площини користувача для вже встановлених PDU-сесій. Тому зниження Q_{DOM} у контрольних точках 300 та 500 UE зумовлено насамперед сервісним і функціональним рівнями, а не відмовою інфраструктурного рівня.

На рисунку 4.5 подано порівняння інтегральних оцінок якості, отриманих у результаті поетапної реалізації методу на сервісному, функціональному та інфраструктурному рівнях.

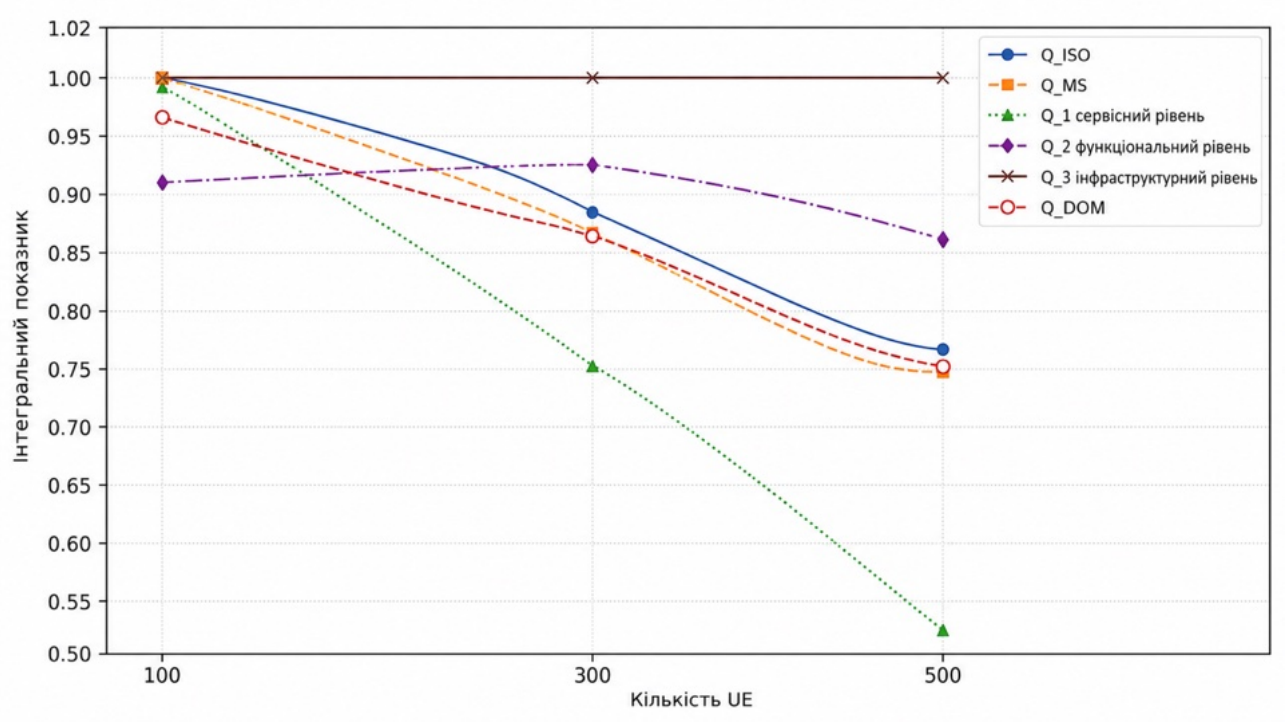

Рис. 4.5. Порівняння інтегральних оцінок Q_{ISO}, Q_{MS} та Q_{DOM} за результатами поетапної реалізації методу

Окремо виконано зіставлення показників площини користувача із контрольними вимогами, наведеними у таблиці 3.5. Це потрібно для того, щоб показати не лише зміну інтегрального Q_{DOM}, а й відповідність фактичних мережевих параметрів допустимим межам для затримки, джитера та втрати пакетів.

Таблиця 4.8

Порівняння показників площини користувача із контрольними межами доменного профілю 5G Core (таблиця 3.5)

Кількість UE	RTT_{avg}, мс	mdev/jitter, мс	Втрата пакетів, %	Пропускна здатність TCP, Мбіт/с	Відповідність контрольним межам таблиця 3.5
100	15,604	0,244	0,0	210,320	Відповідає: RTT ≤ 100/130 мс; jitter ≤ 30 мс; втрата пакетів < 1 %
300	15,692	1,050	0,0	263,471	Відповідає: RTT ≤ 100/130 мс; jitter ≤ 30 мс; втрата пакетів < 1 %
500	15,804	1,279	0,0	220,011	Відповідає: RTT ≤ 100/130 мс; jitter ≤ 30 мс; втрата пакетів < 1 %

Результати таблиці 4.8 свідчать, що для всіх контрольних точок 100, 300 та 500 UE середні значення RTT, mdev/джитер і втрати пакетів не перевищують граничних значень, наведених у таблиці 3.5.

Отже, деградація інтегрального показника у навантажувальній серії зумовлена переважно зниженням процедурної успішності, зростанням T3580 і збільшенням затримок сигналізаційних процедур, тоді як показники площини користувача для успішно встановлених сесій залишався в межах допустимих

мережевих параметрів. пропускна здатність TCP у цій таблиці використано як додатковий фактичний показник пропускної здатності площини користувача, оскільки таблиця 3.5 не встановлює для нього окремого порогового значення.

У таблиці 4.9 узагальнено інтерпретацію результатів навантажувальної перевірки методу оцінювання якості ПЗ ядра 5G, що дає змогу зіставити отримані значення доменних показників із рівнями якості та характером деградації за різних сценаріїв навантаження.

Таблиця 4.9

Інтерпретація результатів навантажувальної перевірки методу оцінки якості ПЗ ядра 5G

Етап методу	Реалізація в експерименті	Використані результати
Етап 1. Визначення набору метрик	Сформовано профіль оцінювання для 5G Core у сценаріях 100, 300 та 500 UE	REG, PDU, TUN, T3580, T_{reg}, T_{pdu}, RTT, втрата пакетів, пропускна здатність TCP, A_{NF}, відмовостійкість
Етап 2. Нормалізація метрик	Показники приведено до інтервалу [0;1] з урахуванням напряму оптимізації	$R_{reg}, R_{pdu}, R_{tun}, R_{\text{T3580}}, R_{RTT}$, R_{loss}, нормовані часові показники та показники пропускної здатності
Етап 3. Зважування метрик	Застосовано ваги відповідно до значущості показників у межах рівнів методу	Вагові коефіцієнти для сервісного, функціонального та інфраструктурного рівнів
Етап 4. Агреговані індекси рівнів	Обчислено часткові індекси Q_1, Q_2 та Q_3 без зміни логіки, наведеної у розділі 3	Q_1: 0,995/0,754/0,527; Q_2: 0,911/0,925/0,855; Q_3: 1,000
Етап 5. Інтегральний індекс	Розраховано Q_{DOM} як підсумковий доменно-орієнтований показник	Q_{DOM}: 0,967; 0,875; 0,760
Етап 6. Інтерпретація	Порівняно контрольні точки навантаження та виявлено перехід до деградованого режиму	100 UE – стабільний режим; 300 UE – помірна деградація; 500 UE – виражена деградація

Таким чином, експериментальна серія А підтверджує практичну придатність сценарної реалізації доменно-орієнтованого методу оцінки якості ПЗ ядра 5G для аналізу поведінки системи за різних рівнів навантаження. На відміну від базового підходу, який фіксує лише окрему функціональну ознаку,

запропонований метод дозволяє кількісно простежити перехід від стабільного режиму 100 UE до режимів помірної та вираженої деградації при 300 і 500 UE за сукупністю доменних процедур, сигналізаційних характеристик, показників площини користувача та інфраструктурних індикаторів. Отримані результати слід інтерпретувати як експериментальну валідацію сценарної реалізації методу, що демонструє його здатність інтегрувати різнорідні показники якості ПЗ ядра 5G.

4.4 Експериментальна перевірка комплексної моделі оцінки якості ПЗ в ІКС

У межах експериментальної серії Б перевірялася чутливість комплексної моделі оцінки якості ПЗ в ІКС до контрольованої деградації мережевих умов. На відміну від серії А, об’єктом перевірки є не доменно-орієнтований метод для ПЗ ядра 5G, а загальна модель інтеграції динамічних метрик для різних класів програмних компонентів ІКС.

Досліджувалися три типові компоненти: Auth-сервіс як транзакційний HTTP-мікросервіс, IoT-компонент із MQTT-взаємодією та SDN-компонент із RESTCONF-доступом до OpenDaylight. Для кожного з них розраховувалося середнє значення $Q_{dynamic}$ у межах відповідного часового вікна профілю деградації.

У таблиці 4.10 узагальнено результати перевірки комплексної моделі оцінювання якості ПЗ в ІКС за профілями деградації мережевих умов, що дає змогу оцінити чутливість інтегрального показника до зміни затримки, втрати пакетів, джитера та пропускної здатності.. Профільні середні значення затримки і пропускної здатності у таблицю не включалися, оскільки з наданих графічних даних достовірно витягуються саме середні значення $Q_{dynamic}$; інші показники використовуються для якісної інтерпретації загальної динаміки експерименту.

Таблиця 4.10

Результати перевірки комплексної моделі за профілями деградації мережевих умов

Компонент	Профіль, %	Середнє значення $Q_{dynamic}$
Auth-сервіс	10	0,821
	50	0,424
	100	0,193
IoT-компонент	10	0,950
	50	0,814
	100	0,587
SDN-компонент	10	0,790
	50	0,431
	100	0,272

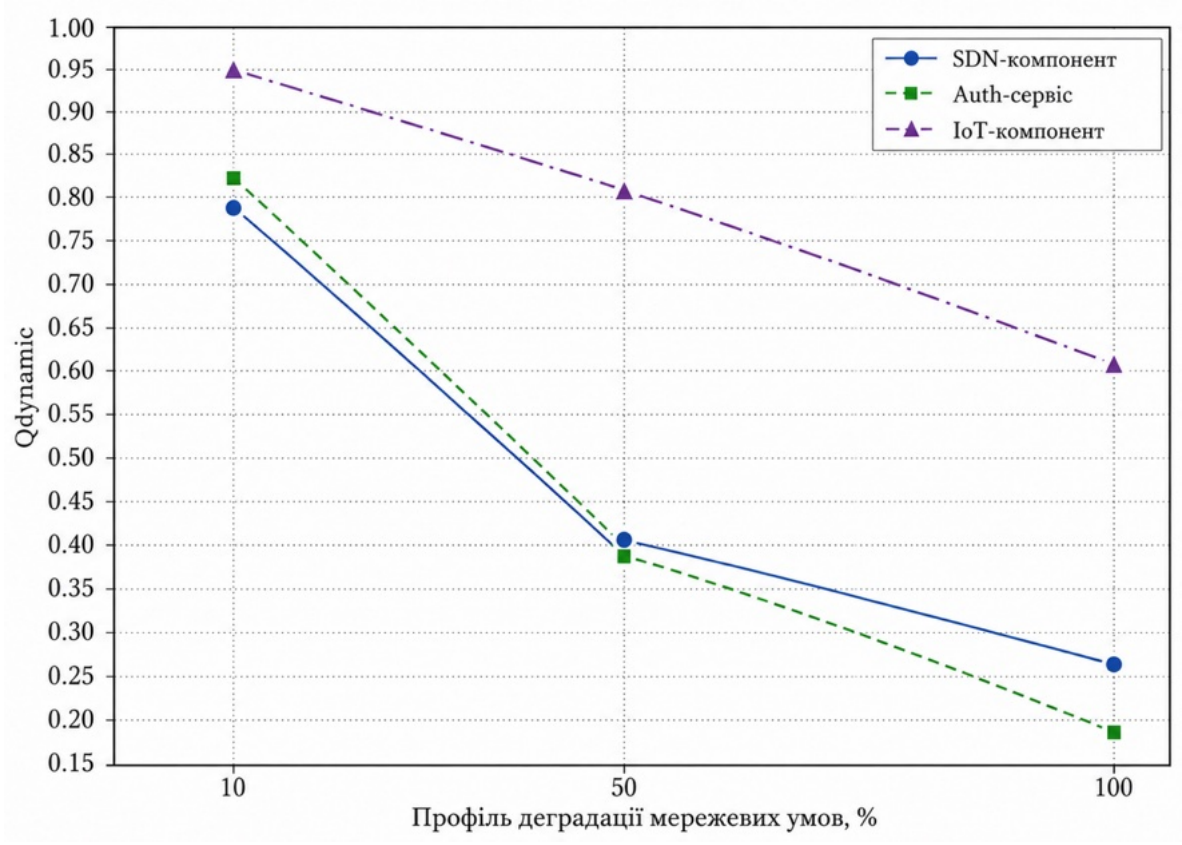

Рис. 4.6. Залежність інтегральної динамічної оцінки $Q_{dynamic}$ від профілю деградації мережевих умов

Результати таблиці 4.10 та рисунка 4.6 свідчать, що для всіх трьох компонентів зі зростанням інтенсивності мережевої деградації значення $Q_{dynamic}$ зменшується. Це підтверджує чутливість динамічної складової комплексної моделі до зміни експлуатаційних умов.

Для кількісного підтвердження чутливості динамічної складової використано різницю між базовим і критичним профілями:

$$\Delta Q_{dynamic} = Q_{dynamic(t_0)} - Q_{dynamic(t_1).} \quad (4.12)$$

За даними таблиці 4.10 отримано такі значення:

$$\Delta Q_{dynamic}(Auth) = 0{,}628; \quad (4.13)$$

$$\Delta Q_{dynamic}(IoT) = 0{,}363; \quad (4.14)$$

$$Q_{dynamic}(SDN) = 0{,}518. \quad (4.15)$$

Це кількісно підтверджує, що модель не лише фіксує факт деградації, а й дозволяє порівняти її інтенсивність для різних класів компонентів ІКС.

Загальні усереднені значення за весь експериментальний прогін можуть використовуватися лише як ілюстрація загального перебігу експерименту. За повний прогін середня $Q_{dynamic}$ становила: Auth – 0,492, IoT – 0,808, SDN – 0,548. Загальна наскрізна затримка за весь прогін становила приблизно 107 мс для Auth, 46,7 мс для IoT та 122 мс для SDN; загальна пропускна здатність – приблизно 464 оп./с для Auth, 9,98 оп./с для IoT та 3,44 оп./с для SDN. Ці значення не підміняють профільних усереднень і використовуються лише для супровідної інтерпретації.

Отримані результати дозволяють зробити висновок, що комплексна модель реагує на зміну умов експлуатації та дає змогу кількісно порівнювати характер деградації різних класів програмних компонентів ІКС. Серія Б є контрольованою лабораторною перевіркою чутливості динамічної складової комплексної моделі до деградації мережевих умов у Proxmox/NetEm-стенді, а не повномасштабною імітацією промислового навантаження або повноцінним QoE-дослідженням.

На рисунку 4.7 подано візуалізацію динаміки зміни показника якості в середовищі Grafana, що відображає реакцію системи оцінювання на зміну навантаження під час експериментальної перевірки.



Рис. 4.7. Динаміка змін якості при зміні навантаження у Grafana

У таблиці 4.11 узагальнено інтерпретацію стійкості програмних компонентів до мережевої деградації, що дає змогу оцінити їхню чутливість до зміни затримки, втрати пакетів, джитера та обмеження пропускної здатності.

Таблиця 4.11

Інтерпретація стійкості компонентів до мережевої деградації

Компонент	Характер зміни $Q_{dynamic}$	Методичне трактування	Практичний висновок
Auth-сервіс	0,821 → 0,424 → 0,193	Найрізкіше падіння серед досліджуваних компонентів; транзакційна HTTP-взаємодія суттєво реагує на затримку та втрати.	Компонент потребує пріоритетного контролю затримки і пропускної здатності у профілях мережевої деградації.
IoT-компонент	0,950 → 0,814 → 0,587	Найвища стійкість у межах експерименту; MQTT probe-взаємодія зберігає відносну стабільність до критичного профілю.	Компонент демонструє кращу експлуатаційну стійкість, але за критичного профілю також потребує контролю втрат.
SDN-компонент	0,790 → 0,431 → 0,272	RESTCONF-взаємодія з OpenDaylight чутлива до збільшення затримки та втрат пакетів.	Для SDN-компонента доцільний окремий контроль доступності RESTCONF і часу відповіді контролера.

Таким чином, експериментальна серія Б підтверджує працездатність і чутливість комплексної моделі в контрольованому лабораторному середовищі Proxmox/NetEm. Модель не підміняє детальну технічну діагностику окремих

сервісів, однак забезпечує уніфікований індекс для зіставлення траєкторій деградації та підтримки рішень щодо оптимізації, масштабування або додаткового тестування компонентів ІКС.

4.5 Обговорення результатів та практичні рекомендації щодо застосування

Отримані у четвертому розділі результати доцільно розглядати у двох взаємопов’язаних площинах: доказовій та прикладній. У доказовій площині вони підтверджують працездатність двох самостійних результатів дослідження: доменно-орієнтованого методу для ПЗ ядра 5G та комплексної моделі оцінки якості ПЗ в ІКС. У прикладній площині вони демонструють можливість використання інтегральних оцінок як інструменту підтримки рішень щодо релізів, конфігураційних змін, масштабування та контролю деградації сервісів.

Результати серії А засвідчили, що доменна релевантність є принципово важливою для систем 5G Core. Підхід, який не враховує латентність сигналізації, масштабованість і відмовостійкість, не дає достатньо чутливого інструмента оцінювання, навіть якщо він спирається на визнану модель якості.

Результати серії Б показали, що комплексна модель є чутливою до контрольованого погіршення мережевих умов і дозволяє фіксувати різні траєкторії деградації для Auth-, IoT- та SDN-компонентів. Найбільшу стійкість у межах дослідженого стенда продемонстрував IoT-компонент, тоді як Auth-сервіс і SDN-компонент виявили вищу чутливість до збільшення затримки та втрат пакетів.

З практичного погляду результати серії Б доцільно використовувати для формування профілів експлуатаційної стійкості компонентів ІКС. Такий профіль не замінює детальне технічне діагностування, але дозволяє попередньо ранжувати компоненти за ризиком деградації та визначати пріоритети подальшого тестування або оптимізації.

Важливою перевагою підходу є сумісність із практиками спостережуваності. Оскільки динамічна складова моделі ґрунтується на даних

Prometheus і Grafana, інтегральна оцінка може бути включена до дашбордів технічного стану сервісу. Це дає змогу відстежувати якість ПЗ в ІКС не лише як підсумкову характеристику після завершення розроблення, а як динамічний параметр поточної експлуатації.

Методичним обмеженням серії Б є лабораторний характер експерименту. Proxmox/NetEm-стенд забезпечує контрольованість і відтворюваність умов, однак не відтворює всього різноманіття промислових багатокористувацьких сценаріїв, поведінки реальних користувачів або повного набору QoE-показників. Тому результати слід трактувати як перевірку чутливості комплексної моделі до мережевої деградації, а не як універсальну оцінку всіх можливих експлуатаційних режимів.

З практичної точки зору результати розділу можуть бути використані для порівняння альтернативних реалізацій компонентів, визначення готовності релізу до впровадження, вибору пріоритетів оптимізації, контролю дотримання SLA та навчально-наукових цілей.

Подальший розвиток доцільно спрямувати на розширення набору динамічних показників, автоматизацію коригування вагових коефіцієнтів і накопичення історичних профілів якості.

4.6 Практична схема впровадження результатів дослідження

Для переходу від експериментальної перевірки до прикладного використання результатів доцільно розглядати впровадження моделі та методу як послідовний процес, що включає організаційні, інструментальні та аналітичні етапи. На організаційному етапі визначаються класи компонентів, для яких система оцінювання застосовується першочергово, а також перелік відповідальних осіб і процедур перегляду вагових коефіцієнтів. На інструментальному – інтегруються джерела даних, статичний аналіз, моніторинг і сценарії навантажувального тестування. На аналітичному – формуються правила інтерпретації та порогові значення для технічних рішень.

У мінімальному варіанті впровадження організація може використовувати лише базовий набір метрик і просту схему обчислення інтегрального показника для кількох критичних сервісів. У розширеному варіанті додаються профілі навантаження, адаптивне коригування ваг і накопичення історії якості. У зрілому варіанті система оцінювання перетворюється на складову загальної практики керування якістю сервісів, де інтегральні індекси використовуються разом із даними спостережуваності, логами інцидентів і результатами релізного контролю.

Перевагою такого підходу є його масштабованість: одержані результати можуть бути впроваджені як у невеликому тестовому середовищі, так і в розподіленій інфраструктурі з великою кількістю сервісів. Важливо, що поетапне впровадження не знижує наукової коректності моделі, а лише дозволяє адаптувати глибину оцінювання до наявної інструментальної та організаційної спроможності.

Звідси випливає, що запропоновані у роботі рішення є придатними для подальшого науково-практичного використання в середовищах розроблення, тестування та експлуатації ПЗ в ІКС.

У таблиці 4.12 узагальнено поетапну схему впровадження запропонованих моделі та методу оцінювання якості ПЗ в ІКС, що охоплює підготовку метрик, налаштування моніторингу, розрахунок інтегральних показників, інтерпретацію результатів та використання оцінки для підтримки прийняття рішень.

Таблиця 4.12

Поетапна схема впровадження моделі та методу оцінювання якості ПЗ в ІКС

Етап життєвого циклу	Що оцінюється	Які результати використовуються
розроблення	статичні метрики, архітектурна керованість, безпека доступу	Q_{static} і часткові статичні показники
передрелізні випробування	динамічні метрики за профілями навантаження	$Q_{dynamic}$ і профілі деградації
ухвалення рішення про реліз	узгоджений інтегральний індекс	Q_{total} та порогові значення прийнятності
продуктивна експлуатація	поточні часові ряди та історія оцінок	виявлення деградації та трендів

Етап життєвого циклу	Що оцінюється	Які результати використовуються
модернізація / масштабування	зіставлення нових і попередніх оцінок	обґрунтування технічних змін

4.7 Обмеження дослідження та напрями подальшої верифікації результатів

Для академічно коректної інтерпретації отриманих результатів необхідно окремо розглянути обмеження проведеного дослідження. Перше обмеження пов’язане з тим, що жоден експериментальний стенд не відтворює у повному обсязі багатоманітність продуктивних середовищ ІКС. Навіть якщо сценарії навантаження та мережевої деградації є контрольованими і близькими до реальних, вони не можуть охопити всі варіанти топології, конкуренції за ресурси, поведінки суміжних сервісів та аномалій продуктивного трафіку. Проте саме контрольованість середовища є необхідною умовою відтворюваності експерименту, а отже і наукової коректності отриманих висновків.

Друге обмеження стосується складу показників, включених до інтегральної моделі. У роботі свідомо використано мінімально достатній набір статичних і динамічних метрик, щоб зберегти баланс між змістовною повнотою та практичною здійсненністю оцінювання. Це означає, що частина потенційно важливих характеристик, наприклад показники енергоефективності, детальні мірники кіберстійкості або специфічні для окремих сервісів QoE-індикатори, не включені до базового варіанта експериментальної перевірки. Водночас логіка моделі дозволяє розширювати її такими показниками без порушення її внутрішньої узгодженості.

Третє обмеження пов’язане з процедурою визначення вагових коефіцієнтів. У роботі виходять із того, що ваги мають визначатися з урахуванням критичності сценарію та предметної області, однак конкретні значення все одно відображають певний профіль пріоритетів. Це означає, що для інших доменів ІКС або інших класів сервісів може знадобитися

переналаштування системи ваг. Власне тому в роботі зроблено акцент не на фіксованому наборі чисел, а на формалізованій процедурі вагового профілювання і можливості адаптивного коригування.

Четверте обмеження стосується зовнішньої валідності доменного методу для 5G Core. Його ефективність переконливо продемонстровано на стеку з відкритим кодом free5GC та на контрольованих сценаріях навантаження, однак для повномасштабного перенесення результатів у промислове середовище доцільною є додаткова перевірка на альтернативних реалізаціях ядра 5G, а також у середовищах з іншими стеками оркестрації та моніторингу. Незважаючи на це, проведена валідація є достатньою для підтвердження методичної та прикладної придатності запропонованого підходу.

Окремо слід підкреслити, що експериментальна серія A є сценарною реалізацією доменно-орієнтованого методу для режимів масштабування 100, 300 та 500 UE у стенді free5GC + UERANSIM. У ній безпосередньо зафіксовано процедурні показники успішної реєстрації, успішного встановлення PDU-сесій, успішного формування TUN-інтерфейсів і T3580, часові характеристики сигналізаційних процедур, показники площини користувача RTT, mdev/джитер, втрата пакетів і пропускна здатність TCP, а також системні індикатори доступності та відмовостійкості для контрольованого сценарію перезапуску SMF. Водночас результати не слід трактувати як вичерпну промислову сертифікацію всіх можливих конфігурацій 5G Core, оскільки дослідження виконано в контрольованому лабораторному середовищі.

П’яте обмеження стосується інструментальної бази. З одного боку, використання Prometheus, Grafana, NetEm, Proxmox VE, Docker, free5GC та UERANSIM забезпечує прозорість і відтворюваність дослідження. З іншого – саме вибір цих інструментів частково визначає те, які метрики доступні безпосередньо, а які потребують додаткових експортерів або перетворень. Відповідно, при перенесенні моделі до іншої інструментальної екосистеми можуть виникати відмінності не в логіці оцінювання, а в технології отримання окремих мір якості.

Попри зазначені обмеження, одержані результати зберігають значну наукову та практичну цінність. Це пояснюється тим, що дослідження не претендує на побудову раз і назавжди універсальної «остаточної» моделі якості, а пропонує формалізований і масштабований підхід, у межах якого набір метрик, порогові значення та вагові коефіцієнти можуть адаптуватися до конкретної ІКС. Саме така адаптивність і є ключовою перевагою для систем, що безперервно еволюціонують.

Подальша верифікація результатів доцільна за кількома напрямами. По-перше, це розширення спектра доменів застосування: приватні 5G-мережі, периферійні середовища, критичні IoT-мережі, авіаційні ІКС, мультихмарні сервіси. По-друге, це поглиблення набору динамічних показників: джитер, інтервали доступності, енерговитрати на транзакцію, оперативність реагування на інциденти безпеки, ізоляція багатокористувацьких середовищ. По-третє, це перехід до напівавтоматичного або повністю автоматичного визначення вагових коефіцієнтів на основі накопичених даних і методів машинного навчання.

Окремий перспективний напрям полягає у поєднанні інтегральної моделі оцінювання з системами керування політиками якості. У такому випадку результати оцінювання можуть використовуватися не лише для аналітики, а й для ініціювання автоматизованих дій: перерозподілу ресурсів, запуску додаткових реплік, зміни конфігурації маршрутизації, обмеження навантаження або перегляду пріоритетів сервісів. Такий перехід від «пасивного» оцінювання до «активного» керування якістю є особливо актуальним для ІКС нового покоління.

Важливим є і напрям подальшої стандартизації. Оскільки у роботі показано, що нормативні моделі типу SQuaRE потребують доменного розширення для ІКС, перспективним є формування типових профілів якості для окремих класів систем: 5G Core, IoT-платформ, SDN/NFV-середовищ, критичних хмарних сервісів. Такі профілі могли б стати проміжною ланкою між загальними міжнародними стандартами та прикладними методиками оцінювання, що використовуються в інженерній практиці.

Таким чином, розгляд обмежень і перспектив не зменшує значущості одержаних результатів, а уточнює межі їх коректної інтерпретації. Запропоновані модель і метод становлять завершений науково-прикладний результат у межах поставлених задач дисертації, але водночас залишають простір для розширення, стандартизації та поглибленої верифікації у ширшому спектрі ІКС.

Крім того, перспективним є напрям поєднання запропонованого підходу з моделями вартості якості. Для багатьох ІКС важливим є не лише досягнення максимальної якості в абсолютному сенсі, а й забезпечення раціонального балансу між рівнем якості, експлуатаційними витратами, витратами на масштабування та витратами на підтримку стійкості сервісу. У такому контексті інтегральна оцінка якості може використовуватися разом із показниками TCO або ROI, що дозволить розглядати результати як основу для економічно обґрунтованого керування розвитком ПЗ.

Ще один напрям подальшої верифікації пов’язаний із переходом від оцінювання окремих компонентів до оцінювання композицій сервісів. У сучасних ІКС кінцева якість часто формується не окремим модулем, а ланцюгом взаємодіючих сервісів. Це означає, що подальші дослідження можуть бути спрямовані на побудову композиційних індексів якості, у яких внесок кожного компонента оцінюється окремо, а потім переноситься на рівень системної сервісної композиції. Такий розвиток є особливо актуальним для NFV/SDN і мікросервісних архітектур.

Важливим є і напрям поєднання інтегральної оцінки якості з механізмами цифрових двійників ІКС. Якщо експериментальний стенд або модель цифрового двійника здатні відтворювати режими навантаження, відмов і топологічних змін, то запропонований підхід може використовуватися для безпечного моделювання сценаріїв модернізації без ризику для продуктивного середовища. Це підвищує дослідницьку цінність запропонованого апарату та відкриває перспективи його використання в задачах прогнозування.

У таблиці 4.13 узагальнено напрями подальшого розвитку та верифікації запропонованих результатів.

Таблиця 4.13

Напрями подальшого розвитку та верифікації запропонованих результатів

Напрям	Що саме доцільно розширювати	Очікуваний науково-практичний ефект
розширення доменів	6G, периферійні середовища, приватні 5G, критичні IoT та авіаційні ІКС	перевірка універсальності та доменної адаптивності
поглиблення набору метрик	джитер, доступність, енергоефективність, оперативність реагування на інциденти безпеки	підвищення чутливості оцінювання до складних сценаріїв
автоматизація ваг	коригування коефіцієнтів методами ML або на основі даних	зменшення суб'єктивності та підвищення адаптивності
інтеграція з керуванням сервісом	зв'язок оцінки з автоскейлінгом і політиками QoS	перехід до активного керування якістю
профілізація стандартів	створення типових профілів якості для класів ІКС	зближення міжнародних стандартів і практичних методик

4.8 Практичні рекомендації щодо використання результатів для експлуатаційного контролю якості

У практиці експлуатації ІКС одержані результати доцільно використовувати як основу для побудови регламенту контролю якості сервісів. Такий регламент має визначати: перелік критичних компонентів, для яких інтегральне оцінювання є обов'язковим; набір профілів навантаження, що відтворюються під час перевірок; періодичність збирання динамічних метрик; правила перегляду вагових коефіцієнтів; критерії прийняття рішень про масштабування, рефакторинг або перегляд конфігурації. Саме у вигляді такого регламенту одержані результати можуть бути найшвидше впроваджені в організаціях, які експлуатують телекомунікаційні, хмарні та сервісно-орієнтовані ІКС.

Для релізного циклу доцільно застосовувати триступеневу схему контролю. На першому ступені оцінюються статичні показники та вирішується,

чи відповідає програмний компонент базовим продуктовим вимогам. На другому ступені проводяться сценарії навантаження і формується динамічна складова оцінки. На третьому ступені обчислюється інтегральний індекс, який порівнюється з пороговими значеннями прийнятності. Такий підхід дозволяє уникнути ситуацій, коли формально працездатний реліз потрапляє в продуктивне середовище попри очевидні ознаки майбутньої деградації сервісу.

Для продуктивної експлуатації особливе значення має накопичення історії інтегральних оцінок і часткових показників. Якщо організація фіксує Q_{static}, $Q_{dynamic}$, і ключові метрики за релізами, профілями навантаження та інцидентами, то надалі стає можливою не лише діагностика поточного стану, а й аналіз трендів. Такий аналіз дозволяє виявляти повільну деградацію якості, оцінювати вплив змін конфігурації та встановлювати, які типи технічних заходів реально покращують якість сервісу.

Практична цінність підходу особливо зростає в умовах, коли якість ПЗ потрібно узгоджувати з вимогами SLA. У цьому разі інтегральна оцінка може бути використана як внутрішній технічний індикатор, а часткові динамічні показники – як безпосередня основа для контролю критичних параметрів сервісу. Такий подвійний рівень інтерпретації дозволяє поєднати інженерний аналіз з управлінськими рішеннями та зробити результати оцінювання корисними як для технічних команд, так і для відповідальних за сервісний рівень.

Отже, одержані результати можуть бути інтегровані у практику забезпечення якості не лише як набір теоретичних положень, а як послідовна процедура організації контролю, аналізу і вдосконалення ПЗ в ІКС. Саме у такому прикладному форматі вони мають найбільшу цінність для середовищ, у яких якість сервісу безпосередньо залежить від стабільності, масштабованості та стійкості програмних компонентів.

4.9 Узагальнення прикладних наслідків експериментальної валідації

З практичного погляду проведена експериментальна валідація підтверджує, що одержані результати можуть бути впроваджені як у форматі

локального інструмента порівняння альтернативних реалізацій, так і у форматі регулярної системи контролю якості ПЗ в ІКС. Саме поєднання повторюваних сценаріїв навантаження, нормалізованих показників і інтегральної інтерпретації забезпечує придатність запропонованого підходу до використання в реальному циклі розроблення, тестування та експлуатації сервісно-критичних систем.

Прикладні наслідки валідації полягають у тому, що запропонований підхід дозволяє перейти від розрізненого набору технічних метрик до узгодженої процедури оцінювання: у 5G Core – через доменно-орієнтований Q_{DOM}, а для різнорідних компонентів ІКС – через $Q_{dynamic}$ та подальше формування Q_{total}. Це створює основу для регулярного контролю деградації, порівняння релізів і обґрунтованого визначення пріоритетів оптимізації.

Висновки до четвертого розділу

У четвертому розділі виконано експериментальну перевірку двох взаємопов'язаних, але різних за об'єктом валідації результатів дослідження: доменно-орієнтованого методу оцінки якості ПЗ ядра 5G та комплексної моделі оцінки якості ПЗ в ІКС. Показано, що обидва результати спираються на єдиний метричний апарат статичних і динамічних показників, проте перевіряються через різні експериментальні сценарії: 5G Core-стенд для методу та Proxmox/NetEm-стенд для моделі.

Експериментальна серія А підтвердила чутливість і діагностичність доменно-орієнтованого методу оцінки якості ПЗ ядра 5G у сценаріях масштабування 100, 300 та 500 UE. Зниження процедурної успішності, зростання T3580 та зміна $Q_1 - Q_3/Q_{DOM}$ показали, що метод не лише фіксує факт деградації, а й дозволяє розмежувати сервісну, функціональну та інфраструктурну складові оцінювання. Інші характеристики повного доменного профілю потребують додаткової верифікації в окремих сценаріях.

Додаткове зіставлення експериментальних показників площини користувача із контрольними межами доменного профілю 5G Core показало, що

для сценаріїв 100, 300 та 500 UE значення RTT, mdev/джитер і втрати пакетів залишалися в межах допустимих значень. Це підтверджує, що запропонований метод не лише формує інтегральну доменну оцінку, а й забезпечує перевірку відповідності окремих експлуатаційних метрик контрольним вимогам, визначеним на етапі формалізації методу.

Експериментальна серія Б показала, що комплексна модель оцінки якості ПЗ в ІКС є чутливою до контрольованої деградації мережевих умов і забезпечує кількісне порівняння різних траєкторій погіршення якості для Auth-, IoT- та SDN-компонентів. Монотонне зниження $Q_{dynamic}$ при переході від профілю 10 % до 100 % підтверджує працездатність динамічної складової моделі та її придатність для підтримки рішень щодо масштабування, оптимізації і релізного контролю.

Сукупно результати четвертого розділу демонструють, що експериментальна валідація підтверджує працездатність, чутливість і практичну придатність запропонованих рішень у межах перевірених сценаріїв. Метод для 5G Core забезпечує доменно-орієнтовану інтерпретацію якості ПЗ телекомунікаційного ядра, а комплексна модель – профільний аналіз якості різнорідних програмних компонентів ІКС. Саме така подвійна валідація забезпечує достатній рівень обґрунтованості результатів для дисертаційного дослідження та їх подальшого науково-практичного використання.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Мету дисертаційного дослідження, що полягала у підвищенні точності, об’єктивності та практичної придатності оцінювання якості ПЗ в ІКС системах на основі інтеграції статичних і динамічних метрик, досягнуто шляхом розроблення комплексної моделі інтегрального оцінювання, доменно-орієнтованого методу для ПЗ ядра 5G та їх експериментальної перевірки в середовищах, наближених до умов експлуатації ІКС.

У межах розв’язання першого завдання проаналізовано сучасний стан проблеми оцінювання якості ПЗ в ІКС, систематизовано стандартизовані, процесно-орієнтовані, атрибутивні, цільово-метричні та багатокритеріальні підходи, а також встановлено їх обмеження щодо застосування в розподілених, віртуалізованих і сервісно-орієнтованих середовищах. Показано, що наявні підходи формують важливу методологічну основу, однак потребують доповнення експлуатаційними та доменно-специфічними показниками.

У межах другого завдання сформовано узгоджену систему статичних і динамічних метрик оцінювання якості ПЗ в ІКС. Статичні метрики відображають продуктові властивості ПЗ, зокрема функціональну повноту, контроль доступу, модульність, складність і адаптивність, тоді як динамічні метрики характеризують фактичну поведінку ПЗ під час функціонування – затримку, пропускну здатність, втрати пакетів, доступність, відновлюваність і масштабованість.

У межах третього завдання обґрунтовано методичні засади нормалізації, зважування, агрегування, адаптивного коригування вагових коефіцієнтів та інтерпретації різнорідних показників якості. Запропоновані залежності забезпечують приведення метрик різної природи до єдиної шкали, урахування напряму їх оптимізації та підвищення чутливості оцінювання до критичних змін динамічних параметрів.

У межах четвертого завдання розроблено комплексну модель оцінювання якості ПЗ в ІКС, яка поєднує статичну та динамічну складові в інтегральному

показнику якості. Модель забезпечує можливість порівняльного аналізу різних реалізацій, конфігурацій і режимів функціонування ПЗ, а також дозволяє розмежовувати структурні причини зниження якості та експлуатаційну деградацію сервісу.

У межах п’ятого завдання розроблено доменно-орієнтований метод оцінювання якості ПЗ ядра 5G, адаптований до сервісно-орієнтованої архітектури, взаємодії мережевих функцій та вимог сучасних телекомунікаційних систем. Метод поєднує базові характеристики якості з доменно-специфічними показниками 5G Core, зокрема затримкою сигналізаційних процедур, масштабованістю, відмовостійкістю, сумісністю з NFV/SDN-середовищем та енергоефективністю.

У межах шостого завдання проведено експериментальну перевірку запропонованих моделі та методу в середовищах, наближених до умов експлуатації ІКС. Результати експериментів підтвердили працездатність доменного методу для ПЗ ядра 5G та практичну придатність комплексної моделі для оцінювання типових програмних компонентів ІКС за різних профілів навантаження, включно з режимами деградації якості.

У межах сьомого завдання встановлено, що доменно-орієнтований метод оцінювання якості ПЗ ядра 5G забезпечує покриття контрольних вимог доменного профілю, визначених для показників площини користувача. Контрольні межі, сформовані для затримки, джитера та втрати пакетів, використано як критерії прийнятності експериментальних результатів, а зіставлення фактичних значень у сценаріях 100, 300 та 500 UE підтвердило відповідність параметрів площини користувача установленим межам. Це дає змогу інтерпретувати інтегральну оцінку якості не ізольовано, а у зв’язку з контрольними доменними вимогами та відокремлювати деградацію сигналізаційних процедур від порушення допустимих мережевих параметрів площини користувача.

У межах восьмого завдання оцінено практичну придатність одержаних результатів для підтримки прийняття рішень щодо контролю якості, виявлення

деградації, порівняння конфігурацій, оптимізації програмних компонентів та інтеграції процедур оцінювання якості в процеси розроблення, тестування й експлуатаційного моніторингу. Додаткове зіставлення результатів із вимогами до передавання інформації в ІКС показало, що запропонований підхід може використовуватися не лише для інтегрального ранжування якості ПЗ, а й для виявлення режимів, у яких порушуються прикладні критерії придатності сервісу.

Отримані результати створюють науково-методичну основу для подальшого розвитку систем оцінювання якості ПЗ у телекомунікаційних, IoT, SDN/NFV, хмарних і сервісно-орієнтованих ІКС. Подальші дослідження доцільно спрямувати на розширення доменних профілів метрик, автоматизацію адаптивного коригування вагових коефіцієнтів та накопичення історичних профілів якості для прогнозування деградації програмних компонентів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

[1]. ISO/IEC 25010:2023. *Systems and software engineering – Systems and software Quality Requirements and Evaluation (SQuaRE) – System and software quality models*. Geneva : International Organization for Standardization, 2023.

[2]. ISO/IEC 25022:2016. *Systems and software engineering – Systems and software Quality Requirements and Evaluation (SQuaRE) – Measurement of quality in use*. Geneva : International Organization for Standardization, 2016.

[3]. ISO/IEC 25023:2016. *Systems and software engineering – Systems and software Quality Requirements and Evaluation (SQuaRE) – Measurement of system and software product quality*. Geneva : International Organization for Standardization, 2016.

[4]. 3GPP TS 23.501. *System Architecture for the 5G System (5GS); Stage 2*. 3rd Generation Partnership Project. Release 20. Version 20.1.0. 2026. URL: https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=3144 (дата звернення: 18.03.2026).

[5]. ETSI GS NFV 002 V1.2.1. *Network Functions Virtualisation (NFV); Architectural Framework*. Sophia Antipolis : European Telecommunications Standards Institute, 2014. URL: https://www.etsi.org/deliver/etsi_gs/nfv/001_099/002/01.02.01_60/gs_nfv002v010201p.pdf (дата звернення: 14.03.2026).

[6]. Bojović Ž. C., Bojović P. D. Software-defined networking: architecture, protocols, and applications. *Foundations and Trends in Networking*. 2025. Vol. 15, No. 1–3. P. 1–271. DOI: https://doi.org/10.1561/1300000077.

[7]. Lee C. A., Bohn R. B., Michel M. *The NIST Cloud Federation Reference Architecture*. NIST Special Publication 500-332. Gaithersburg : National Institute of Standards and Technology, 2020. 92 p. DOI: https://doi.org/10.6028/NIST.SP.500-332.

[8]. 3GPP TS 23.502. *Procedures for the 5G System (5GS); Stage 2*. 3rd Generation Partnership Project. Release 20. Version 20.1.0. 2026. URL:

https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=3145 (дата звернення: 18.03.2026).

[9]. 3GPP TS 33.501. *Security architecture and procedures for 5G System*. 3rd Generation Partnership Project. Release 20. Version 20.1.0. 2026. URL: https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=3169 (дата звернення: 18.03.2026).

[10]. European Union Agency for Cybersecurity (ENISA). *ENISA Threat Landscape Report for 5G Networks*. Heraklion : ENISA, 2020. URL: https://www.enisa.europa.eu/publications/enisa-threat-landscape-report-for-5g-networks (дата звернення: 14.03.2026).

[11]. Mijumbi R., Serrat J., Gorricho J.-L., Bouten N., De Turck F., Boutaba R. Network Function Virtualization: State-of-the-Art and Research Challenges. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2016. Vol. 18, No. 1. P. 236–262. DOI: https://doi.org/10.1109/COMST.2015.2477041.

[12]. ISO/IEC 25000:2014. *Systems and software engineering – Systems and software Quality Requirements and Evaluation (SQuaRE) – Guide to SQuaRE*. Geneva : International Organization for Standardization, 2014.

[13]. ISO/IEC 25040:2024. *Systems and software engineering – Systems and software Quality Requirements and Evaluation (SQuaRE) – Quality evaluation framework*. Geneva : International Organization for Standardization, 2024.

[14]. Гамрецький Р. М., Гнатюк В. О. Огляд та аналіз методів та моделей оцінки якості програмного забезпечення в інформаційно-комунікаційних системах. *Наукоємні технології*. 2024. № 4(64). С. 435–448. DOI: https://doi.org/10.18372/2310-5461.63.19752.

[15]. Гамрецький Р., Гнатюк В. Аналіз метрик кібербезпеки для оцінки якості програмного забезпечення. *Problems of Scientific, Technical and Legal Support for Cybersecurity in the Modern World* : monograph / ed. by S. Semenov, M. Muchacki. Krakow : Wydawnictwo Naukowe UKEN, 2024. С. 126–136. ISBN 978-86-68020-86-1.

[16]. Hamretskyi R. M., Zander K. Y., Gnatyuk V. O. Analysis of methods for software quality assessment in aviation information and communication systems. *Proceedings of The Eleventh World Congress "Aviation in the XXI-st Century" – Safety in Aviation and Space Technologies*, September 25–27, 2024. Kyiv : National Aviation University, 2024. P. 2.1.14–2.1.16.

[17]. Hamretskyi R., Gnatyuk V. Methods and Models for Software Quality Assessment in Information and Communication Systems. *Proceedings of the 2024 IEEE 7th International Conference on Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Development (APUAVD)*, October 22–24, 2024. Kyiv, Ukraine : IEEE, 2024. P. 62–67. ISBN 979-8-3315-3413-4. DOI: https://doi.org/10.1109/APUAVD64488.2024.10765910.

[18]. CMMI Institute. *CMMI for Development, Version 2.0*. Pittsburgh : CMMI Institute, 2018.

[19]. McCall J. A., Richards P. K., Walters G. F. *Factors in Software Quality*. Rome Air Development Center, General Electric, 1977.

[20]. Boehm B. W., Brown J. R., Kaspar H. *Characteristics of Software Quality*. Amsterdam : North-Holland, 1978.

[21]. Dromey R. G. A model for software product quality. *IEEE Transactions on Software Engineering*. 1995. Vol. 21, No. 2. P. 146–162. DOI: https://doi.org/10.1109/32.345830.

[22]. Basili V. R., Caldiera G., Rombach H. D. The Goal Question Metric Approach. *Encyclopedia of Software Engineering*. 1994. P. 528–532.

[23]. ISO/IEC 9126-1:2001. *Software engineering – Product quality – Part 1: Quality model*. Geneva : International Organization for Standardization, 2001.

[24]. Challa J. S., Paul A., Dada Y., Nerella V., Srivastava P. R., Singh A. P. Integrated Software Quality Evaluation: A Fuzzy Multi-Criteria Approach. *Journal of Information Processing Systems*. 2011. Vol. 7, No. 3. P. 473–518. DOI: https://doi.org/10.3745/JIPS.2011.7.3.473.

[25]. Verma A., Agarwal A., Rathore M., Bisht S., Singh D. Preferential Selection of Software Quality Models Based on a Multi-Criteria Decision-Making

Approach. *International Journal of Software Innovation*. 2023. Vol. 11, No. 1. P. 1–13. DOI: https://doi.org/10.4018/IJSI.315739.

[26]. Mishra A., Linh N. T. D., Bhardwaj M., Pinto C. M. A. (eds.). *Multi-Criteria Decision Models in Software Reliability: Methods and Applications*. 1st ed. Boca Raton : CRC Press, 2022. DOI: https://doi.org/10.1201/9780367816414.

[27]. Oakland J. S. *TQM: Text with Cases*. 3rd ed. Oxford : Butterworth-Heinemann, 2003. 483 p. ISBN 978-0-7506-5740-2.

[28]. Pyzdek T., Keller P. A. *The Six Sigma Handbook: A Complete Guide for Green Belts, Black Belts, and Managers at All Levels*. 4th ed. New York : McGraw-Hill Education, 2014. 704 p. ISBN 978-0-07-184053-8.

[29]. Okumoto K., Mijumbi R., Asthana A. Software Quality Assurance. *Telecommunication Networks – Trends and Developments*. London : IntechOpen, 2019. DOI: https://doi.org/10.5772/intechopen.79839.

[30]. Гамрецький Р. М., Гнатюк В. О. Метод оцінки якості програмного забезпечення ядра 5G. *Herald of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences*. 2025. № 355(4). С. 106–111. DOI: https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-355-15.

[31]. Gnatyuk V., Batrak O., Hamretskyi R., Golovan M. Organizational and technical support of cyber security using a virtual assistant. *Cyber Hygiene & Conflict Management in Global Information Networks 2024 (CH&CMiGIN 2024)*. Kyiv, Ukraine, Feb. 2025. DOI: https://doi.org/10.5281/zenodo.19119346.

[32]. Гамрецький Р. Методи та моделі оцінки якості програмного забезпечення в інформаційно-комунікаційних системах. *Політ. Сучасні проблеми науки* : зб. тез доп. міжнар. наук.-практ. конф., м. Київ, 4–7 квіт. 2023 р. Київ, 2023. С. 8–9.

[33]. Гамрецький Р. Якість програмного забезпечення в телекомунікаційних системах. *Політ. Сучасні проблеми науки* : зб. тез доп. міжнар. наук.-практ. конф., м. Київ, 4–7 квіт. 2023 р. Київ, 2023. С. 31–32.

[34]. Гамрецький Р. М., Гнатюк В. О. Вплив якості програмного забезпечення на функціонування інформаційно-комунікаційних систем. *ABIA-*

2023 : зб. тез доп. міжнар. наук.-техн. конф., м. Київ, 18–20 квіт. 2023 р. Київ, 2023. С. 7.37–7.39.

[35]. Гамрецький Р., Зандер К. Аналіз метрик кібербезпеки для оцінювання якості програмного забезпечення в інформаційно-комунікаційних системах. *ITSec* : зб. тез доп. міжнар. наук.-техн. конф., м. Ужгород, 2–4 трав. 2023 р. Ужгород, 2023. С. 60–62.

[36]. Гамрецький Р., Гнатюк В. Роль якості програмного забезпечення у резильєнтності інформаційно-комунікаційних систем. *Живучість та резильєнтність критичної інфраструктури – 2023* : зб. мат. міжнар. наук.-практ. конф., м. Київ, 19 жовт. 2023 р. Київ : ІПМЕ ім. Г. Є. Пухова НАН України, 2023. С. 104–105.

[37]. Гамрецький Р., Гнатюк В. Статичний аналіз коду програмного забезпечення в інформаційно-комунікаційних системах. *Інформаційна безпека та інформаційні технології* : збірник тез доповідей VI Всеукраїнської науково-практичної конференції молодих учених, студентів і курсантів, м. Львів, 30 листопада 2023 р. Львів : ЛДУ БЖД, 2023. С. 258–260.

[38]. Hamretskyi R., Gnatyuk V. Wielokryterialna ocena jakości oprogramowania w systemach informatycznych oraz komunikacyjnych zgodnie z modelem SQuaRE. *Przetwarzanie, transmisja i bezpieczeństwo informacji* : зб. мат. Uniwersytet Bielsko-Bialski, 2023. С. 55–62. ISBN 978-83-67652-12-4. DOI: https://doi.org/10.53052/9788367652124.06.

[39]. Гамрецький Р. Програмне забезпечення інформаційно-комунікаційних систем. *Політ. Сучасні проблеми науки. Аеронавігація. Електроніка. Телекомунікації* : тези доповідей XXIV Міжнародної науково-практичної конференції здобувачів вищої освіти і молодих учених. Київ : НАУ, 2024. С. 23–24.

[40]. Гамрецький Р., Гнатюк В. Аналіз методів оцінки кібербезпеки програмного забезпечення. *ITSec: Безпека інформаційних технологій* : матеріали XIII Міжнародної науково-технічної конференції, м. Львів, 9–11 трав. 2024 р. Львів : ЛНУ ім. І. Франка, 2024. С. 73–74.

[41]. Гамрецький Р., Гнатюк В. Аналіз методів та моделей оцінки якості програмного забезпечення в інформаційно-комунікаційних системах. *Політ. Сучасні проблеми науки. Аеронавігація. Електроніка. Телекомунікації* : тези доповідей XXV Міжнародної науково-практичної конференції здобувачів вищої освіти і молодих учених, Київ, 1–4 квіт. 2025 р. Київ : Державний університет «Київський авіаційний інститут», 2025. С. 23–24.

[42]. Гамрецький Р., Гнатюк В. Особливості оцінки якості програмного забезпечення ядра 5G. *Проблеми експлуатації та захисту інформаційно-комунікаційних систем* : тези науково-практичної конференції, Київ, 4–6 черв. 2025 р. Київ : Вид-во Державного університету «Київський авіаційний інститут», 2025. С. 18–19.

[43]. Gnatyuk V., Gorbachov I., Hamretskyi R. Dynamic Management Method of Network Slices in 5G for Improving QoS in VoIP. *2025 IEEE 8th International Conference on Methods and Systems of Navigation and Motion Control (MSNMC)*. Kyiv, Ukraine, 2025. P. 1–4. DOI: https://doi.org/10.1109/MSNMC61130.2025.11399739.

[44]. Гнатюк В. О., Гамрецький Р. Метод оцінки якості програмного забезпечення для захисту інформації у комп'ютерних мережах. *Інформаційна безпека та інформаційні технології* : збірник тез доповідей VII Всеукраїнської науково-практичної конференції, м. Львів, 27 листопада 2025 р. Львів : ЛДУ БЖД, 2025. С. 300–302.

[45]. Lee M.-C. Software Quality Factors and Software Quality Metrics to Enhance Software Quality Assurance. *Current Journal of Applied Science and Technology*. 2014. Vol. 4, No. 21. P. 3069–3095. DOI: https://doi.org/10.9734/BJAST/2014/10548.

[46]. Humayed A., Lin J., Li F., Luo B. Cyber-Physical Systems Security – A Survey. *IEEE Internet of Things Journal*. 2017. Vol. 4, No. 6. P. 1802–1831. DOI: https://doi.org/10.1109/JIOT.2017.2703172.

[47]. Sampaio S., Souto P., Vasques F. A review of scalability and topological stability issues in IEEE 802.11s wireless mesh networks deployments. *International*

Journal of Communication Systems. 2016. Vol. 29. P. 671–693. DOI: https://doi.org/10.1002/dac.2929.

[48]. Luntovskyy A., Globa L. Performance, Reliability and Scalability for IoT. *2019 International Conference on Information and Digital Technologies (IDT)*. Zilina, Slovakia, 2019. P. 316–321. DOI: https://doi.org/10.1109/DT.2019.8813679.

[49]. free5GC. *Architecture*. URL: https://free5gc.org/guide/Architecture/ (дата звернення: 02.03.2026).

[50]. Håkegård J. E., Lundkvist H., Rauniyar A., Morris P. Performance Evaluation of an Open Source Implementation of a 5G Standalone Platform. *IEEE Access*. 2024. DOI: https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3367120.

[51]. Mukute T., Mamushiane L., Lysko A. A., Modroiu E.-R., Magedanz T., Mwangama J. Control Plane Performance Benchmarking and Feature Analysis of Popular Open-Source 5G Core Networks: OpenAirInterface, Open5GS, and free5GC. *IEEE Access*. 2024. Vol. 12. P. 113336–113360. DOI: https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3441725.

[52]. Конахович Г. Ф., Козлюк І. О., Дорошенко С. С. Впровадження IP-технологій в мережі авіаційного зв’язку України. *Наукоємні технології*. 2025. № 3(67). С. 360–371. DOI: https://doi.org/10.18372/2310-5461.67.20025.

[53]. Radjenović D., Heričko M., Torkar R., Živkovič A. Software Fault Prediction Metrics: A Systematic Literature Review. *Information and Software Technology*. 2013. Vol. 55, No. 8. P. 1397–1418. DOI: https://doi.org/10.1016/j.infsof.2013.02.009.

[54]. Li Z. et al. VulDeePecker: A Deep Learning-Based System for Vulnerability Detection. *Proceedings of the 25th Annual Network and Distributed System Security Symposium (NDSS)*. 2018. DOI: https://doi.org/10.14722/ndss.2018.23158.

[55]. Desmal A., Madan Z. Measuring the Service Quality of Mobile Smart Devices: A Framework for Best Practices. London : IntechOpen, 2024. DOI: https://doi.org/10.5772/intechopen.113993.

[56]. Shmatko O., Kolomiitsev O., Fedorchenko V., Mykhailenko I., Tretiak V. Integrating analytical statistical models, sequential pattern mining, and fuzzy set theory for advanced mobile app reliability assessment. *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*. 2023. No. 26. P. 78–86. DOI: https://doi.org/10.30837/ITSSI.2023.26.078.

[57]. Alzamil Z. A. Software Coupling and Cohesion Model for Measuring the Quality of Software Components. *Computers, Materials & Continua*. 2023. Vol. 77, No. 3. P. 3139–3161. DOI: https://doi.org/10.32604/cmc.2023.042711.

[58]. *Microservices: Science and Engineering* / ed. by A. Bucchiarone, N. Dragoni, S. Dustdar, P. Lago, M. Mazzara, V. Rivera, A. Sadovykh. Cham : Springer, 2020. XII, 364 p. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-31646-4.

[59]. Hawilo H., Shami A., Mirahmadi M., Asal R. NFV: State of the Art, Challenges, and Implementation in Next Generation Mobile Networks (vEPC). *IEEE Network*. 2014. Vol. 28, No. 6. P. 18–26. DOI: https://doi.org/10.1109/MNET.2014.6963800.

[60]. Tahir A., MacDonell S. G. A Systematic Mapping Study on Dynamic Metrics and Software Quality. *arXiv preprint*. 2021. arXiv:2101.03669. URL: https://arxiv.org/abs/2101.03669 (дата звернення: 14.03.2026).

[61]. Kuliamin V. V. A Survey of Software Dynamic Analysis Methods. *Programming and Computer Software*. 2024. Vol. 50, No. 1. P. 90–114. DOI: https://doi.org/10.1134/S0361768824010079.

[62]. Schnoor H., Hasselbring W. Comparing Static and Dynamic Weighted Software Coupling Metrics. *Computers*. 2020. Vol. 9, No. 2. Article 24. DOI: https://doi.org/10.3390/computers9020024.

[63]. Ebert C., Gallardo G., Hernantes J., Serrano N. DevOps. *IEEE Software*. 2016. Vol. 33, No. 3. P. 94–100. DOI: https://doi.org/10.1109/MS.2016.68.

[64]. Iqbal H., Babar M. An Approach for Analyzing ISO/IEC 25010 Product Quality Requirements Based on Fuzzy Logic and Likert Scale for Decision Support Systems. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*. 2016. Vol. 7, No. 12. DOI: https://doi.org/10.14569/IJACSA.2016.071232.

[65]. ISO/IEC 27001:2022. *Information security, cybersecurity and privacy protection – Information security management systems – Requirements*. Geneva : International Organization for Standardization, 2022.

[66]. The OWASP Foundation. *OWASP Top 10:2025*. URL: https://owasp.org/Top10/2025/ (дата звернення: 14.03.2026).

[67]. MITRE. *Common Weakness Enumeration (CWE)*. URL: https://cwe.mitre.org/ (дата звернення: 14.03.2026).

[68]. FIRST. *Common Vulnerability Scoring System v4.0: Specification Document*. Forum of Incident Response and Security Teams, 2023. URL: https://www.first.org/cvss/v4-0/cvss-v40-specification.pdf (дата звернення: 14.03.2026).

[69]. Bondarenko L., Masesov M., Buzayeva K., Hurzhii I., Ilienko O., Gnatyuk V. Method of Calculation the Accessibility of the Information and Telecommunication Networks of the Tactical Link of Management. *International Journal of Computer Network and Information Security*. 2021. Vol. 13, No. 5. P. 68–78. DOI: https://doi.org/10.5815/ijcnis.2021.05.06.

[70]. Shevchenko S., Zhdanova Y., Kryvytska O., Shevchenko H. Fuzzy Cognitive Mapping as a Scenario Approach for Information Security Risk Analysis. *Cybersecurity Providing in Information and Telecommunication Systems II*. CEUR Workshop Proceedings. 2024. Vol. 3826. P. 356–362.

[71]. Al-Azzeh J. S., Al Hadidi M., Odarchenko R., Gnatyuk S., Shevchuk Z., Hu Z. Analysis of Self-Similar Traffic Models in Computer Networks. *International Review on Modelling and Simulations*. 2017. Vol. 10, No. 5. P. 328–336. DOI: https://doi.org/10.15866/iremos.v10i5.12009.

[72]. Гнатюк В. О., Гамрецький Р. М. Комплексна модель оцінки якості програмного забезпечення в інформаційно-комунікаційних системах з урахуванням динамічних параметрів. *Наукоємні технології*. 2026. № 1(69). С. 109–117. DOI: https://doi.org/10.18372/2310-5461.69.20951.

[73]. Newman S. *Building Microservices: Designing Fine-Grained Systems*. 2nd ed. Sebastopol : O'Reilly Media, 2021.

[74]. Gnatyuk V., Hamretskyi R. A domain-oriented method for evaluating 5G core network software quality. *Cyber Security and Data Protection 2025 (CSDP 2025). CEUR Workshop Proceedings.* 2025. Vol. 4042. P. 193–202. DOI: https://doi.org/10.5281/zenodo.19130829. ISSN 1613-0073.

[75]. Nikaein N., Marina M. K., Manickam S., Dawson A., Knopp R., Bonnet C. OpenAirInterface: A Flexible Platform for 5G Research. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*. 2014. Vol. 44, No. 5. P. 33–38. DOI: https://doi.org/10.1145/2677046.2677053.

[76]. Pérez P., Ruiz J., Benito I., López R. A Parametric Quality Model to Evaluate the Performance of Tele-Operated Driving Services over 5G Networks. *Multimedia Tools and Applications*. 2022. Vol. 81, No. 9. P. 12287–12303. DOI: https://doi.org/10.1007/s11042-021-11251-x.

[77]. Bojović P. D., Malbašić T., Vujošević D., Martić G., Bojović Ž. Dynamic QoS Management for a Flexible 5G/6G Network Core: A Step toward a Higher Programmability. *Sensors*. 2022. Vol. 22, No. 8. Article 2849. DOI: https://doi.org/10.3390/s22082849.

[78]. ISO/IEC 27002:2022. *Information security, cybersecurity and privacy protection – Information security controls*. Geneva : International Organization for Standardization, 2022.

[79]. Pascoe C., Quinn S., Scarfone K. *The NIST Cybersecurity Framework (CSF) 2.0*. NIST Cybersecurity White Paper. CSWP 29. Gaithersburg : National Institute of Standards and Technology, 2024. DOI: https://doi.org/10.6028/NIST.CSWP.29.

[80]. Foukas X., Patounas G., Elmokashfi A., Marina M. K. Network Slicing in 5G: Survey and Challenges. *IEEE Communications Magazine*. 2017. Vol. 55, No. 5. P. 94–100. DOI: https://doi.org/10.1109/MCOM.2017.1600951.

ДОДАТОК А

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Гамрецький Р. М., Гнатюк В. О. Огляд та аналіз методів та моделей оцінки якості програмного забезпечення в інформаційно-комунікаційних системах. *Наукоємні технології.* 2024. № 4(64). С. 435–448. DOI: https://doi.org/10.18372/2310-5461.63.19752.

2. Гамрецький Р., Гнатюк В. Метод оцінки якості програмного забезпечення ядра 5G. *Herald of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences. 2025.* Т. 355, № 4(355). С. 106–111. DOI: https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-355-15.

3. Gnatyuk V., Batrak O., Hamretskyi R., Golovan M. Organizational and technical support of cyber security using a virtual assistant. *Cyber Hygiene & Conflict Management in Global Information Networks 2024 (CH&CMiGIN 2024). CEUR Workshop Proceedings*. 2025. Vol. 3925. P. 317–324. DOI: https://doi.org/10.5281/zenodo.19119346. ISSN 1613-0073.

4. Gnatyuk V., Hamretskyi R. A domain-oriented method for evaluating 5G core network software quality. *Cyber Security and Data Protection 2025 (CSDP 2025). CEUR Workshop Proceedings.* 2025. Vol. 4042. P. 193–202. DOI: https://doi.org/10.5281/zenodo.19130829. ISSN 1613-0073

5. Гнатюк В. О, Гамрецький Р. М. Комплексна модель оцінки якості програмного забезпечення в інформаційно-комунікаційних системах з урахуванням динамічних параметрів. *Наукоємні технології*. 2026. №1(69), с. 109-17, DOI: https://doi.org/10.18372/2310-5461.69.20951.

Матеріали доповідей на конференціях, які засвідчують апробацію результатів дисертації

6. Гамрецький Р. Методи та моделі оцінки якості програмного забезпечення в інформаційно-комунікаційних системах. *Політ. Сучасні проблеми науки* : зб. тез доп. Міжнар. наук.-практ. конф. здобувачів вищої освіти і молодих учених, м. Київ, 4–7 квіт. 2023 р. Київ, 2023. С. 8–9.

7. Гамрецький Р. Якість програмного забезпечення в телекомунікаційних системах. *Політ. Сучасні проблеми науки* : зб. тез доп. Міжнар. наук.-практ. конф. здобувачів вищої освіти і молодих учених, м. Київ, 4–7 квіт. 2023 р. Київ, 2023. С. 31–32.

8. Гамрецький Р. М., Гнатюк В. О. Вплив якості програмного забезпечення на функціонування інформаційно-комунікаційних систем. *ABIA-2023* : зб. тез доп. XVI Міжнар. наук.-техн. конф., м. Київ, 18–20 квіт. 2023 р. Київ, 2023. С. 7.37–7.39.

9. Гамрецький Р., Зандер К. Аналіз метрик кібербезпеки для оцінювання якості програмного забезпечення в інформаційно-комунікаційних системах. *ITSec* : зб. тез доп. Міжнар. наук.-техн. конф., м. Ужгород, 2–4 трав. 2023 р. Ужгород, 2023. С. 60–62.

10. Гамрецький Р., Гнатюк В. Роль якості програмного забезпечення у резильєнтності інформаційно-комунікаційних систем. *Живучість та резильєнтність критичної інфраструктури – 2023* : зб. матеріалів Міжнар. наук.-практ. конф., м. Київ, 19 жовт. 2023 р. Київ : ІПМЕ ім. Г. Є. Пухова НАН України, 2023. С. 104–105.

11. Гамрецький Р., Гнатюк В. Статичний аналіз коду програмного забезпечення в інформаційно-комунікаційних системах. *Інформаційна безпека та інформаційні технології* : зб. тез доп. VI Всеукр. наук.-практ. конф. молодих учених, студентів і курсантів, м. Львів, 30 листоп. 2023 р. Львів : ЛДУ БЖД, 2023. С. 258–260.

12. Hamretskyi R., Gnatyuk V. Wielokryterialna ocena jakości oprogramowania w systemach informatycznych oraz komunikacyjnych zgodnie z modelem SQuaRE. *Przetwarzanie, transmisja i bezpieczeństwo informacji* : zb. mat. Bielsko-Biała : Uniwersytet Bielsko-Bialski, 2023. S. 55–62. ISBN 978-83-67652-12-4. DOI: https://doi.org/10.53052/9788367652124.06.

13. Гамрецький Р., Гнатюк В. Аналіз метрик кібербезпеки для оцінки якості програмного забезпечення. *Problems of Scientific, Technical and Legal Support for Cybersecurity in the Modern World* : monograph / eds. S. Semenov, M.

Muchacki. Krakow : Wydawnictwo Naukowe UKEN, 2024. C. 126–136. ISBN 978-86-68020-86-1.

14. Гамрецький Р. Програмне забезпечення інформаційно-комунікаційних систем. *Політ. Сучасні проблеми науки. Аеронавігація. Електроніка. Телекомунікації* : тези доп. XXIV Міжнар. наук.-практ. конф. здобувачів вищої освіти і молодих учених. Київ : НАУ, 2024. С. 23–24.

15. Гамрецький Р., Гнатюк В. Аналіз методів оцінки кібербезпеки програмного забезпечення. *ITSec: Безпека інформаційних технологій* : матеріали XIII Міжнар. наук.-техн. конф., м. Львів, 9–11 трав. 2024 р. Львів : ЛНУ ім. І. Франка, 2024. С. 73–74.

16. Hamretskyi R. M., Zander K. Y., Gnatyuk V. O. Analysis of methods for software quality assessment in aviation information and communication systems. *Proceedings of the Eleventh World Congress "Aviation in the XXI Century" – Safety in Aviation and Space Technologies*, Kyiv, September 25–27, 2024. Kyiv : National Aviation University, 2024. P. 2.1.14–2.1.16.

17. Hamretskyi R., Gnatyuk V. Methods and models for software quality assessment in information and communication systems. *Proceedings of the 2024 IEEE 7th International Conference on Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Development (APUAVD)*, Kyiv, Ukraine, October 22–24, 2024. Kyiv : IEEE, 2024. P. 62–67. ISBN 979-8-3315-3413-4. DOI: https://doi.org/10.1109/APUAVD64488.2024.10765910.

18. Гамрецький Р., Гнатюк В. Аналіз методів та моделей оцінки якості програмного забезпечення в інформаційно-комунікаційних системах. *Політ. Сучасні проблеми науки. Аеронавігація. Електроніка. Телекомунікації* : тези доп. XXV Міжнар. наук.-практ. конф. здобувачів вищої освіти і молодих учених, м. Київ, 1–4 квіт. 2025 р. Київ : Державний університет "Київський авіаційний інститут", 2025. С. 23–24.

19. Гамрецький Р., Гнатюк В. Особливості оцінки якості програмного забезпечення ядра 5G. *Проблеми експлуатації та захисту інформаційно-комунікаційних систем* : тези наук.-практ. конф., м. Київ, 4–6 черв. 2025 р. Київ

: Вид-во Державного університету “Київський авіаційний інститут”, 2025. С. 18–19.

20. Gnatyuk V., Gorbachov I., Hamretskyi R. Dynamic management method of network slices in 5G for improving QoS in VoIP. *2025 IEEE 8th International Conference on Methods and Systems of Navigation and Motion Control (MSNMC)*, Kyiv, Ukraine, 2025. P. 1–4. DOI: https://doi.org/10.1109/MSNMC61130.2025.11399739.

21. Гнатюк В. О., Гамрецький Р. Метод оцінки якості програмного забезпечення для захисту інформації у комп’ютерних мережах. *Інформаційна безпека та інформаційні технології* : зб. тез доп. VII Всеукр. наук.-практ. конф., м. Львів, 27 листоп. 2025 р. Львів : ЛДУ БЖД, 2025. С. 300–302.

ДОДАТОК Б

ЗАТВЕРДЖУЮ
Проректор з навчальної роботи та якості освіти
ДУ «Київський авіаційний інститут»
_____ Л.В. Шаульська
(підпис)
«__» _____ 2026 року
М.П.

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ
результатів дисертаційної роботи здобувача наукового ступеня доктора філософії Гамрецького Романа Михайловича у навчальний процес Державного некомерційного підприємства «Державний університет «Київський авіаційний інститут»

Ми, що нижче підписалися, завідувач кафедри телекомунікаційних та радіоелектронних систем факультету аеронавігації, електроніки та телекомунікацій, к.т.н., доц., В.О. Гнатюк, декан факультету аеронавігації, електроніки та телекомунікацій, д.т.н. проф., Р.С. Одарченко склали цей акт про те, що результати наукових досліджень за темою дисертаційної роботи на здобуття наукового ступеня доктора філософії Гамрецького Романа Михайловича «Методи та моделі оцінки якості програмного забезпечення в інформаційно-комунікаційних системах» за спеціальністю 172 «Телекомунікації та радіотехніка» використовуються у навчальному процесі на кафедрі телекомунікаційних та радіоелектронних систем факультету аеронавігації, електроніки та телекомунікацій Державного некомерційного підприємства «Державний університет «Київський авіаційний інститут».

Найменування впровадженого результату	**Форма впровадження і досягнутий фактичний ефект**
Метод комплексної оцінки якості програмного забезпечення ядра 5G-мереж.	Впроваджено в навчальний процес у вигляді методичних рекомендацій та програмних засобів для оцінювання якості програмного забезпечення ядра 5G-мереж. Забезпечено підвищення рівня підготовки студентів у частині комплексного аналізу показників якості та прийняття обґрунтованих інженерних рішень.
Метод розрахунку інтегрального показника якості програмного забезпечення з алгоритмом адаптивного коригування вагових коефіцієнтів.	Впроваджено як складову навчально-методичного забезпечення дисциплін. Забезпечено формування у студентів навичок розрахунку інтегральних показників якості та застосування адаптивних алгоритмів коригування вагових коефіцієнтів при виконанні курсових і кваліфікаційних робіт.
Комплексна багаторівнева модель інтегральної оцінки якості програмного забезпечення інформаційно-комунікаційних систем.	Впроваджено як теоретичну основу вивчення підходів до багаторівневої оцінки якості програмного забезпечення інформаційно-комунікаційних систем. Сприяло систематизації знань студентів щодо структури показників якості та їх використанню під час проєктування і дослідження інформаційно-комунікаційних систем.

Завідувач кафедри
Телекомунікаційних та
радіоелектронних систем,
к.т.н., доц. _____ В.О. Гнатюк

Декан Факультету
аеронавігації, електроніки та
телекомунікацій
д.т.н., проф. _____ Р.С. Одарченко

ДОДАТОК В

ТОВ «СМАРТ ПАВЕР»
ЄДРПОУ: 44869223
Рахунок: J31194576392881

Адреса: м.Київ, вул.Кавказька, 11
Телефон: +38 093 9511446
E-mail: info@smartpower.com.ua

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ
результатів дисертаційної роботи здобувача наукового ступеня доктора філософії Гамрецького Романа Михайловича у діяльність компанії «Smart Power»

Найменування впровадженого результату	**Форма впровадження і досягнутий фактичний ефект**
1. Метод комплексної оцінки якості програмного забезпечення ядра 5G-мереж. 2. Комплексна багаторівнева модель інтегральної оцінки якості програмного забезпечення інформаційно-комунікаційних систем.	Розроблені метод і модель впроваджено у діяльність компанії у вигляді алгоритмів і програмних засобів для комплексної оцінки якості програмного забезпечення інформаційно-комунікаційних систем, зокрема ядра 5G-мереж. За результатами впровадження забезпечено підвищення точності та об'єктивності оцінювання показників якості програмного забезпечення, скорочення часу прийняття інженерних рішень, а також підвищення загального рівня якості програмного забезпечення, що використовується в інформаційно-комунікаційних системах. На основі розроблених методу та моделі створено програмне забезпечення для здійснення комплексної оцінки якості програмного забезпечення інформаційно-комунікаційних систем.

Директор ТОВ «СМАРТ ПАВЕР» Валерій ВОЛКІВСЬКИЙ

«04» травня 2026 р.

ДОДАТОК Г

Скрипт підготовки середовища free5GC на VM1

```
#!/usr/bin/env bash
set -euo pipefail

MODE="${1:-prepare}"

REQUIRED_NF="nrf amf smf upf ausf udm udr pcf"

collect_snapshot() {
  LABEL="${1:-snapshot}"
  PDU_OK="${2:-0}"

  OUT_DIR="$HOME/5gc-
experiment/results/core_snapshot_${LABEL}_$(date +%Y%m%d_%H%M%S)"
  mkdir -p "$OUT_DIR"

  STATUS_CSV="$OUT_DIR/nf_availability.csv"
  STATS_RAW="$OUT_DIR/docker_stats_raw.csv"
  SUMMARY="$OUT_DIR/summary.txt"

  echo "nf,status,running" > "$STATUS_CSV"

  TOTAL=0
  RUNNING=0

  for NF in $REQUIRED_NF; do
    TOTAL=$((TOTAL + 1))
    STATE=$(sudo docker inspect -f '{{.State.Status}}' "$NF"
2>/dev/null || echo "missing")
    IS_RUNNING=$(sudo docker inspect -f '{{.State.Running}}' "$NF"
2>/dev/null || echo "false")

    if [ "$IS_RUNNING" = "true" ]; then
      RUNNING=$((RUNNING + 1))
    fi

    echo "$NF,$STATE,$IS_RUNNING" >> "$STATUS_CSV"
  done

  A_NF=$(awk "BEGIN {printf \"%.3f\", $RUNNING / $TOTAL}")

  sudo docker stats --no-stream --format "table
{{.Name}},{{.CPUPerc}},{{.MemUsage}}" > "$STATS_RAW"

  {
    echo "===== CORE SNAPSHOT ====="
    date
    echo "Label: $LABEL"
```

```
    echo "PDU_OK: $PDU_OK"
    echo
    echo "Required NF: $REQUIRED_NF"
    echo "Running NF: $RUNNING / $TOTAL"
    echo "A_NF=$A_NF"
    echo
    echo "===== NF status ====="
    cat "$STATUS_CSV"
    echo
    echo "===== docker stats raw ====="
    cat "$STATS_RAW"
    echo
    echo "Note: CPU/RAM are interpreted as resource-efficiency
proxy, not direct energy consumption."
  } | tee "$SUMMARY"

  echo "Saved: $OUT_DIR"
}

if [ "$MODE" = "snapshot" ]; then
  LABEL="${2:-manual}"
  PDU_OK="${3:-0}"
  collect_snapshot "$LABEL" "$PDU_OK"
  exit 0
fi

COUNT="$1"
SQN="$2"
BASE_UE="${3:-imsi-208930000000001}"

echo "===== PREPARE free5GC POINT ====="
echo "COUNT=$COUNT"
echo "SQN=$SQN"
echo "BASE_UE=$BASE_UE"

echo
echo "===== Clone subscribers ====="
~/5gc-experiment/scripts/01_clone_ui_subscriber_safe.sh "$COUNT"
"$BASE_UE" "$SQN"

echo
echo "===== Clean runtime state ====="
MONGO=$(sudo docker ps --format "{{.Names}}" | grep -Ei
"mongo|mongodb" | head -n1)

sudo docker exec "$MONGO" mongo free5gc --eval "
var baseNum = 208930000000001;
var count = $COUNT;

for (var i = 1; i <= count; i++) {
  var ueId = 'imsi-' + String(baseNum + i - 1);
```

```
db.getCollection('subscriptionData.contextData.amf3gppAccess').delet
eMany({ ueId: ueId });

db.getCollection('subscriptionData.authenticationData.authentication
Status').deleteMany({ ueId: ueId });
}

print('runtime state cleaned for ' + count + ' UE');
"


echo
echo "===== Restart free5GC components ====="
cd /opt/free5gc-compose

sudo docker restart chf
sleep 8

sudo docker restart upf
sleep 8

sudo docker restart udr udm ausf pcf smf amf
sleep 45

echo
echo "===== Get current AMF / UPF IP ====="
AMF_IP=$(sudo docker inspect -f '{{range
.NetworkSettings.Networks}}{{.IPAddress}}{{end}}' amf)
UPF_IP=$(sudo docker inspect -f '{{range
.NetworkSettings.Networks}}{{.IPAddress}}{{end}}' upf)
BR=$(ip -br link | awk '$1 ~ /free5gc|br-/ {print $1; exit}')

echo "AMF_IP=$AMF_IP"
echo "UPF_IP=$UPF_IP"
echo "BR=$BR"

echo
echo "===== Apply NAT / GTP-U rules ====="
sudo sysctl -w net.ipv4.ip_forward=1
sudo sysctl -w net.ipv4.conf.all.rp_filter=0
sudo sysctl -w net.ipv4.conf.default.rp_filter=0
sudo sysctl -w net.ipv4.conf.eth0.rp_filter=0

if [ -n "$BR" ]; then
  sudo sysctl -w "net.ipv4.conf.$BR.rp_filter=0" || true
fi

sudo nft delete table ip qexp 2>/dev/null || true
sudo nft add table ip qexp
sudo nft add chain ip qexp forward '{ type filter hook forward
priority filter; policy accept; }'
```

```
sudo nft add chain ip qexp postnat '{ type nat hook postrouting
priority srcnat; policy accept; }'

if [ -n "$BR" ]; then
  sudo nft add rule ip qexp forward iifname "eth0" oifname "$BR"
accept
  sudo nft add rule ip qexp forward iifname "$BR" oifname "eth0"
accept
fi

sudo nft add rule ip qexp postnat ip saddr 10.60.0.0/16 oifname
"eth0" masquerade
sudo nft add rule ip qexp postnat ip saddr 10.100.200.0/24 oifname
"eth0" masquerade

sudo nft list table ip raw >/dev/null 2>&1 || sudo nft add table ip
raw
sudo nft list chain ip raw PREROUTING >/dev/null 2>&1 || sudo nft
add chain ip raw PREROUTING '{ type filter hook prerouting priority
raw; policy accept; }'
sudo nft insert rule ip raw PREROUTING iifname "eth0" ip daddr
"$UPF_IP" udp dport 2152 accept

echo
echo "===== Start / check iperf3 server ====="
mkdir -p "$HOME/5gc-experiment/results"

if ! ss -lntup | grep -q ":5201"; then
  nohup iperf3 -s -B 0.0.0.0 -p 5201 > "$HOME/5gc-
experiment/results/iperf3_server.log" 2>&1 &
  sleep 2
fi

ss -lntup | grep 5201 || true

echo
echo "===== Check SMF / UPF PFCP ====="
sudo docker logs smf --tail=150 | grep -iE
"PFCP|UPF|Association|Accepted|error|warn" || true

echo
echo "===== Core snapshot after prepare ====="
collect_snapshot "${COUNT}ue_after_prepare" 0

echo
echo "===== RESULT ====="
echo "COUNT=$COUNT"
echo "AMF_IP=$AMF_IP"
echo "UPF_IP=$UPF_IP"
echo "BR=$BR"

mkdir -p "$HOME/5gc-experiment/results"
```

```
cat > "$HOME/5gc-experiment/results/latest_core_point.env" <<ENV
COUNT=$COUNT
AMF_IP=$AMF_IP
UPF_IP=$UPF_IP
BR=$BR
ENV

echo
echo "Use this AMF_IP on UERANSIM side:"
echo "$AMF_IP"
```

ДОДАТОК Д

Скрипт запуску UERANSIM і збору експериментальних метрик на VM2

```
#!/usr/bin/env bash
set -u

COUNT="$1"
AMF_IP="$2"
DELAY="${3:-3}"
CORE_IP="${4:-192.168.0.120}"
TARGET="${5:-8.8.8.8}"
IPERF_PORT="${6:-5201}"

echo "===== RUN UERANSIM POINT ====="
echo "COUNT=$COUNT"
echo "AMF_IP=$AMF_IP"
echo "DELAY=$DELAY"
echo "CORE_IP=$CORE_IP"
echo "TARGET=$TARGET"

sudo -v

echo
echo "===== Stop old UE/gNB and delete old TUN interfaces ====="
sudo pkill -f nr-ue || true
sudo pkill -f nr-gnb || true

for IFACE in $(ip -br link | awk '/uesimtun/ {print $1}'); do
  echo "Deleting $IFACE"
  sudo ip link delete "$IFACE" 2>/dev/null || true
done

ip -br addr | grep uesimtun || true

echo
echo "===== Update route and gNB AMF IP ====="
sudo ip route replace 10.100.200.0/24 via "$CORE_IP" dev eth0

sudo sed -i "/amfConfigs:/,/port:/ s/address:.*/address: $AMF_IP/"
/opt/UERANSIM/config/free5gc-gnb.yaml

grep -n "amfConfigs\|address\|port\|linkIp\|ngapIp\|gtpIp"
/opt/UERANSIM/config/free5gc-gnb.yaml

echo
echo "===== Generate UE configs ====="
~/5gc-experiment/scripts/02_generate_ue_configs_fast.sh "$COUNT"

echo
```

```
echo "===== Start gNB ====="
mkdir -p "$HOME/5gc-experiment/results/gnb_logs"

GNB_LOG="$HOME/5gc-
experiment/results/gnb_logs/gnb_${COUNT}ue_$(date
+%Y%m%d_%H%M%S).log"

cd /opt/UERANSIM
sudo ./build/nr-gnb -c config/free5gc-gnb.yaml > "$GNB_LOG" 2>&1 &
GNB_PID=$!

echo "GNB_PID=$GNB_PID"
echo "GNB_LOG=$GNB_LOG"

sleep 10

echo
echo "===== gNB log check ====="
tail -n 60 "$GNB_LOG"

echo
echo "===== Start UE ====="
~/5gc-experiment/scripts/03_start_ues.sh "$COUNT" "$DELAY"

echo
echo "===== Wait after UE start ====="
sleep 120

RUN_DIR=$(ls -td "$HOME/5gc-experiment/runs/run_${COUNT}ue_"* |
head -n1)
OUT_DIR="$RUN_DIR/domain_metrics"
mkdir -p "$OUT_DIR"

echo
echo "RUN_DIR=$RUN_DIR"
echo "OUT_DIR=$OUT_DIR"

echo
echo "===== A1: Base procedure metrics ====="
REG=$(grep -R "Initial Registration is successful" "$RUN_DIR/logs"
2>/dev/null | wc -l)
PDU=$(grep -R "PDU Session establishment is successful"
"$RUN_DIR/logs" 2>/dev/null | wc -l)
TUN_LOG=$(grep -R -iE "TUN interface.*is up|Connection setup for PDU
session.*successful" "$RUN_DIR/logs" 2>/dev/null | wc -l)
TUN_LIVE=$(ip -br addr | grep uesimtun | wc -l)
CONG=$(grep -R -i "CONGESTION" "$RUN_DIR/logs" 2>/dev/null | wc -l)
T3580=$(grep -R -i "T3580" "$RUN_DIR/logs" 2>/dev/null | wc -l)
ERR=$(grep -R -iE "failed|error|reject" "$RUN_DIR/logs" 2>/dev/null
| wc -l)

cat > "$OUT_DIR/base_metrics.csv" <<CSV
```

```
ue_count,delay_sec,registration_ok,pdu_ok,tun_log_count,tun_live_cou
nt,congestion_count,t3580_count,error_count,run_dir
$COUNT,$DELAY,$REG,$PDU,$TUN_LOG,$TUN_LIVE,$CONG,$T3580,$ERR,$RUN_DI
R
CSV

cat "$OUT_DIR/base_metrics.csv"

echo
echo "===== A2: Signaling latency from UE logs ====="
python3 - "$COUNT" "$RUN_DIR" <<'PY'
import re
import csv
import sys
from pathlib import Path
from datetime import datetime
from statistics import mean, median

ue_count = int(sys.argv[1])
run_dir = Path(sys.argv[2])
logs_dir = run_dir / "logs"
out_dir = run_dir / "domain_metrics"
out_dir.mkdir(parents=True, exist_ok=True)

per_ue_csv = out_dir / "signaling_latency_per_ue.csv"
summary_csv = out_dir / "signaling_latency_summary.csv"

ts_re = re.compile(r"\[(\d{4}-\d{2}-\d{2}
\d{2}:\d{2}:\d{2}\.\d+)\]")

def parse_ts(line):
    m = ts_re.search(line)
    if not m:
        return None
    return datetime.strptime(m.group(1), "%Y-%m-%d %H:%M:%S.%f")

def ms_between(a, b):
    return round((b - a).total_seconds() * 1000, 3)

rows = []

for log_file in sorted(logs_dir.glob("ue-*.log")):
    reg_start = None
    reg_ok = None
    pdu_start = None
    pdu_ok = None

    with log_file.open(errors="ignore") as f:
        for line in f:
            ts = parse_ts(line)
            if ts is None:
                continue
```

```
            if "Sending Initial Registration" in line and reg_start
is None:
                reg_start = ts

            if "Initial Registration is successful" in line and
reg_ok is None:
                reg_ok = ts

            if "Sending PDU Session Establishment Request" in line
and pdu_start is None:
                pdu_start = ts

            if "PDU Session establishment is successful" in line and
pdu_ok is None:
                pdu_ok = ts

    reg_ms = ms_between(reg_start, reg_ok) if reg_start and reg_ok
else ""
    pdu_ms = ms_between(pdu_start, pdu_ok) if pdu_start and pdu_ok
else ""

    rows.append({
        "ue_count": ue_count,
        "ue_log": log_file.name,
        "registration_latency_ms": reg_ms,
        "pdu_session_latency_ms": pdu_ms,
        "registration_ok": "yes" if reg_ms != "" else "no",
        "pdu_ok": "yes" if pdu_ms != "" else "no",
    })

with per_ue_csv.open("w", newline="") as f:
    writer = csv.DictWriter(f, fieldnames=[
        "ue_count", "ue_log", "registration_latency_ms",
        "pdu_session_latency_ms", "registration_ok", "pdu_ok"
    ])
    writer.writeheader()
    writer.writerows(rows)

def pctl(values, p):
    values = sorted(values)
    if not values:
        return ""
    k = int(round((len(values) - 1) * p / 100))
    return values[k]

reg_values = [float(r["registration_latency_ms"]) for r in rows if
r["registration_latency_ms"] != ""]
pdu_values = [float(r["pdu_session_latency_ms"]) for r in rows if
r["pdu_session_latency_ms"] != ""]

summary = {
```

```
    "ue_count": ue_count,
    "run_dir": str(run_dir),
    "registration_samples": len(reg_values),
    "registration_avg_ms": round(mean(reg_values), 3) if reg_values
else "",
    "registration_median_ms": round(median(reg_values), 3) if
reg_values else "",
    "registration_p95_ms": round(pctl(reg_values, 95), 3) if
reg_values else "",
    "registration_min_ms": round(min(reg_values), 3) if reg_values
else "",
    "registration_max_ms": round(max(reg_values), 3) if reg_values
else "",
    "pdu_samples": len(pdu_values),
    "pdu_avg_ms": round(mean(pdu_values), 3) if pdu_values else "",
    "pdu_median_ms": round(median(pdu_values), 3) if pdu_values else
"",
    "pdu_p95_ms": round(pctl(pdu_values, 95), 3) if pdu_values else
"",
    "pdu_min_ms": round(min(pdu_values), 3) if pdu_values else "",
    "pdu_max_ms": round(max(pdu_values), 3) if pdu_values else "",
}

with summary_csv.open("w", newline="") as f:
    writer = csv.DictWriter(f, fieldnames=list(summary.keys()))
    writer.writeheader()
    writer.writerow(summary)

print(f"Saved: {per_ue_csv}")
print(f"Saved: {summary_csv}")
with summary_csv.open() as f:
    print(f.read())
PY

echo
echo "===== A3: User-plane RTT / packet loss / mdev-jitter
====="
PING_CSV="$OUT_DIR/user_plane_ping.csv"
REQ_CSV="$OUT_DIR/domain_requirements_comparison.csv"

echo
"ue_count,iface,target,tx,rx,packet_loss_percent,rtt_min_ms,rtt_avg_
ms,rtt_max_ms,rtt_mdev_ms,status" > "$PING_CSV"

IFACES=$(ip -br addr | awk '/uesimtun/ {print $1}' | sort -V)
IFACE_COUNT=$(echo "$IFACES" | grep -c uesimtun || true)

if [ "$IFACE_COUNT" -gt 0 ]; then
  FIRST=$(echo "$IFACES" | head -n1)
  MID=$(echo "$IFACES" | awk -v n="$IFACE_COUNT"
'NR==int((n+1)/2){print; exit}')
  LAST=$(echo "$IFACES" | tail -n1)
```

```
  SELECTED=$(printf "%s\n%s\n%s\n" "$FIRST" "$MID" "$LAST" | awk
'NF && !seen[$0]++')

  echo "Selected TUN interfaces:"
  echo "$SELECTED"

  for IFACE in $SELECTED; do
    echo "Measuring $IFACE -> $TARGET"

    sudo ip route replace "$TARGET/32" dev "$IFACE" 2>/dev/null ||
true

    LOG_FILE="$OUT_DIR/ping_${IFACE}.log"
    timeout 130 ping -c 100 -W 1 -I "$IFACE" "$TARGET" > "$LOG_FILE"
2>&1
    STATUS=$?

    SUMMARY_LINE=$(grep -E "packets transmitted|packet loss"
"$LOG_FILE" | tail -n1 || true)
    RTT_LINE=$(grep -E "rtt min/avg/max|round-trip min/avg/max"
"$LOG_FILE" | tail -n1 || true)

    TX=$(echo "$SUMMARY_LINE" | awk '{print $1}')
    RX=$(echo "$SUMMARY_LINE" | awk '{print $4}')
    LOSS=$(echo "$SUMMARY_LINE" | grep -oE '[0-9]+(\.[0-9]+)?%
packet loss' | awk '{print $1}' | tr -d '%')

    [ -z "${TX:-}" ] && TX=0
    [ -z "${RX:-}" ] && RX=0
    [ -z "${LOSS:-}" ] && LOSS=100

    if [ -n "$RTT_LINE" ]; then
      VALUES=$(echo "$RTT_LINE" | awk -F'=' '{print $2}' | awk
'{print $1}')
      RTT_MIN=$(echo "$VALUES" | cut -d'/' -f1)
      RTT_AVG=$(echo "$VALUES" | cut -d'/' -f2)
      RTT_MAX=$(echo "$VALUES" | cut -d'/' -f3)
      RTT_MDEV=$(echo "$VALUES" | cut -d'/' -f4)
    else
      RTT_MIN=""
      RTT_AVG=""
      RTT_MAX=""
      RTT_MDEV=""
    fi

    echo
"$COUNT,$IFACE,$TARGET,$TX,$RX,$LOSS,$RTT_MIN,$RTT_AVG,$RTT_MAX,$RTT
_MDEV,$STATUS" >> "$PING_CSV"
  done
else
  echo "No uesimtun interfaces for user-plane measurement"
fi
```

```
python3 - "$PING_CSV" "$REQ_CSV" <<'PY'
import csv
import sys

src = sys.argv[1]
out = sys.argv[2]

rows = []

with open(src) as f:
    reader = csv.DictReader(f)
    for r in reader:
        rtt = r["rtt_avg_ms"]
        jitter = r["rtt_mdev_ms"]
        loss = r["packet_loss_percent"]

        rtt_f = float(rtt) if rtt else None
        jitter_f = float(jitter) if jitter else None
        loss_f = float(loss) if loss else 100.0

        k_control = rtt_f / 100 if rtt_f is not None else ""
        k_voice = rtt_f / 130 if rtt_f is not None else ""
        k_jitter = jitter_f / 30 if jitter_f is not None else ""
        k_loss = loss_f / 1

        R_RTT = max(1 - (rtt_f / 100), 0) if rtt_f is not None else
0
        R_loss = max(1 - (loss_f / 1), 0)

        rows.append({
            "ue_count": r["ue_count"],
            "iface": r["iface"],
            "rtt_avg_ms": rtt,
            "rtt_mdev_ms_as_jitter": jitter,
            "packet_loss_percent": loss,
            "k_control_latency_100ms": round(k_control, 3) if
k_control != "" else "",
            "k_voice_latency_130ms": round(k_voice, 3) if k_voice !=
"" else "",
            "k_jitter_30ms": round(k_jitter, 3) if k_jitter != ""
else "",
            "k_packet_loss_1percent": round(k_loss, 3),
            "R_RTT": round(R_RTT, 3),
            "R_loss": round(R_loss, 3),
            "control_latency_ok": "yes" if rtt_f is not None and
rtt_f <= 100 else "no",
            "voice_latency_ok": "yes" if rtt_f is not None and rtt_f
<= 130 else "no",
            "jitter_ok": "yes" if jitter_f is not None and jitter_f
<= 30 else "no",
            "packet_loss_ok": "yes" if loss_f < 1 else "no",
```

```
        })

with open(out, "w", newline="") as f:
    writer = csv.DictWriter(f, fieldnames=list(rows[0].keys()) if
rows else [
        "ue_count", "iface", "rtt_avg_ms", "rtt_mdev_ms_as_jitter",
        "packet_loss_percent", "k_control_latency_100ms",
        "k_voice_latency_130ms", "k_jitter_30ms",
        "k_packet_loss_1percent", "R_RTT", "R_loss",
        "control_latency_ok", "voice_latency_ok", "jitter_ok",
        "packet_loss_ok"
    ])
    writer.writeheader()
    writer.writerows(rows)

print(f"Saved: {out}")
PY

cat "$PING_CSV"
cat "$REQ_CSV"

echo
echo "====== A3: TCP throughput via iperf3 ====="
THR_CSV="$OUT_DIR/user_plane_throughput.csv"
echo
"ue_count,iface,src_ip,server,protocol,duration_sec,throughput_mbps,
status" > "$THR_CSV"

if command -v iperf3 >/dev/null 2>&1 && [ "$IFACE_COUNT" -gt 0 ];
then
  for IFACE in $SELECTED; do
    SRC_IP=$(ip -4 addr show "$IFACE" | awk '/inet / {print $2}' |
cut -d/ -f1 | head -n1)

    if [ -z "$SRC_IP" ]; then
      echo "$COUNT,$IFACE,,${CORE_IP},tcp,10,0,no_src_ip" >>
"$THR_CSV"
      continue
    fi

    sudo ip route replace "$CORE_IP/32" dev "$IFACE" 2>/dev/null ||
true

    JSON_FILE="$OUT_DIR/iperf_tcp_${IFACE}.json"

    timeout 20 iperf3 -c "$CORE_IP" -p "$IPERF_PORT" -B "$SRC_IP" -t
10 -J > "$JSON_FILE" 2>/dev/null
    STATUS=$?

    MBPS=$(python3 - "$JSON_FILE" <<'PY'
import json
import sys
```

```
try:
    d = json.load(open(sys.argv[1]))
    bps = d["end"]["sum_received"]["bits_per_second"]
    print(round(bps / 1_000_000, 3))
except Exception:
    print(0)
PY
)

    echo "$COUNT,$IFACE,$SRC_IP,$CORE_IP,tcp,10,$MBPS,$STATUS" >>
"$THR_CSV"
  done
else
  echo "iperf3 not available or no TUN interfaces"
fi

cat "$THR_CSV"

echo
echo "===== Integral scores Q_ISO / Q_MS / Q_DOM / Q_DOM_ext
====="
python3 - "$COUNT" "$OUT_DIR" "$RUN_DIR" "$DELAY" "$REG" "$PDU"
"$TUN_LOG" "$T3580" <<'PY'
import csv
import sys
from pathlib import Path
from statistics import mean

N = int(sys.argv[1])
out_dir = Path(sys.argv[2])
run_dir = sys.argv[3]
delay = sys.argv[4]
REG = int(sys.argv[5])
PDU = int(sys.argv[6])
TUN = int(sys.argv[7])
T3580 = int(sys.argv[8])

ping_csv = out_dir / "user_plane_ping.csv"
score_csv = out_dir / "q_scores.csv"

Rreg = REG / N if N else 0
Rpdu = PDU / N if N else 0
Rtun = TUN / N if N else 0
RT3580 = 1 - min(T3580 / N, 1) if N else 0

rtts = []
losses = []

if ping_csv.exists():
    with ping_csv.open() as f:
        reader = csv.DictReader(f)
```

```
        for r in reader:
            if r.get("rtt_avg_ms"):
                rtts.append(float(r["rtt_avg_ms"]))
            if r.get("packet_loss_percent"):
                losses.append(float(r["packet_loss_percent"]))

rtt_mean = mean(rtts) if rtts else None
loss_mean = mean(losses) if losses else None

RRTT = max(1 - rtt_mean / 100, 0) if rtt_mean is not None else ""
Rloss = max(1 - loss_mean / 1, 0) if loss_mean is not None else ""

Q_ISO = Rreg
Q_MS = 0.5 * Rreg + 0.5 * Rpdu
Q_DOM = 0.25 * Rreg + 0.30 * Rpdu + 0.30 * Rtun + 0.15 * RT3580

if RRTT != "" and Rloss != "":
    Q_DOM_ext = (
        0.18 * Rreg
        + 0.22 * Rpdu
        + 0.20 * Rtun
        + 0.15 * RT3580
        + 0.15 * RRTT
        + 0.10 * Rloss
    )
else:
    Q_DOM_ext = ""

row = {
    "ue_count": N,
    "delay_sec": delay,
    "registration_ok": REG,
    "pdu_ok": PDU,
    "tun_count": TUN,
    "t3580_count": T3580,
    "Rreg": round(Rreg, 3),
    "Rpdu": round(Rpdu, 3),
    "Rtun": round(Rtun, 3),
    "RT3580": round(RT3580, 3),
    "RRTT": round(RRTT, 3) if RRTT != "" else "",
    "Rloss": round(Rloss, 3) if Rloss != "" else "",
    "Q_ISO": round(Q_ISO, 3),
    "Q_MS": round(Q_MS, 3),
    "Q_DOM": round(Q_DOM, 3),
    "Q_DOM_ext": round(Q_DOM_ext, 3) if Q_DOM_ext != "" else "",
    "run_dir": run_dir,
}

with score_csv.open("w", newline="") as f:
    writer = csv.DictWriter(f, fieldnames=list(row.keys()))
    writer.writeheader()
    writer.writerow(row)
```

```
summary = Path.home() / "5gc-
experiment/results/repeat_100_300_500_full_summary.csv"
new_file = not summary.exists()

with summary.open("a", newline="") as f:
    writer = csv.DictWriter(f, fieldnames=list(row.keys()))
    if new_file:
        writer.writeheader()
    writer.writerow(row)

print(f"Saved: {score_csv}")
print(f"Updated: {summary}")
print(row)
PY

echo
echo "===== RESULT FILES ====="
echo "RUN_DIR=$RUN_DIR"
echo "OUT_DIR=$OUT_DIR"
echo
ls -lh "$OUT_DIR"
echo
echo "Full summary:"
cat "$HOME/5gc-
experiment/results/repeat_100_300_500_full_summary.csv"
```

ДОДАТОК Е

Скрипт автоматизованого запуску експерименту серії Б

```
#!/usr/bin/env bash

set -euo pipefail

# ============================
# Experiment configuration
# ============================

ROUTER_SSH="rh@10.10.10.1"

DURATION=600          # 10 minutes per profile
PAUSE_DURATION=120    # 2 minutes pause between profiles

AUTH_URL="http://10.10.20.30:8080/login"

BASE_DIR="$HOME/experiment-results"
LOG_DIR="$BASE_DIR/logs"
WINDOWS_FILE="$BASE_DIR/profile_windows.csv"

mkdir -p "$LOG_DIR"

RUN_ID="$(date +%Y%m%d-%H%M%S)"

# ============================
# Helper functions
# ============================

log() {
  echo "[$(date '+%Y-%m-%d %H:%M:%S')] $*"
}

check_command() {
  if ! command -v "$1" >/dev/null 2>&1; then
    log "ERROR: command '$1' not found."
    log "Install it first and run again."
    exit 1
  fi
}

router_cmd() {
  ssh "$ROUTER_SSH" "$1"
}

set_profile() {
  local profile="$1"
```

```
  log "Setting profile ${profile}% on routervm..."
  router_cmd "sudo -n /usr/local/bin/set_profile.sh ${profile}"

  sleep 5

  log "Current experiment profile metrics:"
  router_cmd "curl -s http://localhost:9200/metrics | grep -E
'experiment_profile_percent|experiment_packet_loss_percent|experimen
t_network_delay_ms'"
}

clear_profile() {
  log "Clearing profile on routervm..."
  router_cmd "sudo -n /usr/local/bin/set_profile.sh clear"

  sleep 5

  log "Current experiment profile metrics:"
  router_cmd "curl -s http://localhost:9200/metrics | grep -E
'experiment_profile_percent|experiment_packet_loss_percent|experimen
t_network_delay_ms'"
}

precheck() {
  log "Checking required local commands..."
  check_command wrk
  check_command timeout
  check_command curl
  check_command ssh

  log "Checking routervm SSH..."
  router_cmd "hostname"

  log "Checking experiment-exporter on routervm..."
  curl -fsS --connect-timeout 3 --max-time 10 \
    http://10.10.10.1:9200/metrics | grep experiment >/dev/null

  log "Checking Auth service..."
  curl -fsS --connect-timeout 3 --max-time 10 \
    http://10.10.20.30:8080/actuator/health >/dev/null

  log "Checking auth-client-probe..."
  curl -fsS --connect-timeout 3 --max-time 10 \
    http://10.10.10.10:9300/metrics | grep auth_client >/dev/null

  log "Checking iot-client-probe..."
  curl -fsS --connect-timeout 3 --max-time 10 \
    http://10.10.10.10:9500/metrics | grep iot_probe >/dev/null

  log "Checking sdn-client-probe..."
  curl -fsS --connect-timeout 3 --max-time 10 \
    http://10.10.10.10:9400/metrics | grep sdn_client >/dev/null
```

```
  log "Checking IoT probe connection status..."
  curl -fsS --connect-timeout 3 --max-time 10 \
    http://10.10.10.10:9500/metrics | grep iot_probe_connected ||
true

  log "Checking SDN status code..."
  curl -fsS --connect-timeout 3 --max-time 10 \
    http://10.10.10.10:9400/metrics | grep sdn_client_status_code
|| true

  log "Precheck completed successfully."
}

run_auth_load() {
  local profile="$1"

  local auth_log="$LOG_DIR/auth-${profile}-${RUN_ID}.log"

  log "Starting Auth HTTP load for profile ${profile}% for
$((DURATION / 60)) minutes..."

  timeout "$DURATION" wrk -t2 -c25 -d"${DURATION}s" "$AUTH_URL" >
"$auth_log" 2>&1 &
  AUTH_PID=$!

  log "Auth load PID: $AUTH_PID"

  wait "$AUTH_PID" || true

  log "Auth load for profile ${profile}% finished."
  log "Auth log saved: $auth_log"
}

run_profile() {
  local profile="$1"

  log "=========================================="
  log "PROFILE ${profile}% START"
  log "=========================================="

  set_profile "$profile"

  local start_time
  start_time="$(date '+%Y-%m-%d %H:%M:%S')"

  log "Profile ${profile}% measurement window started at:
$start_time"

  run_auth_load "$profile"

  local end_time
```

```
  end_time="$(date '+%Y-%m-%d %H:%M:%S')"

  echo "${profile},${start_time},${end_time}" >> "$WINDOWS_FILE"

  log "PROFILE ${profile}% WINDOW:"
  log "START: $start_time"
  log "END:   $end_time"

  log "Clearing after profile ${profile}%..."
  clear_profile
}

pause_between_profiles() {
  log "Pause between profiles: $((PAUSE_DURATION / 60)) minutes..."
  sleep "$PAUSE_DURATION"
}

# ============================
# Main
# ============================

trap 'log "Interrupted. Clearing router profile..."; clear_profile;
exit 1' INT TERM

log "Full experiment started."
log "Run ID: $RUN_ID"

echo "profile,start_time,end_time" > "$WINDOWS_FILE"

precheck

clear_profile
sleep 10

run_profile 10
pause_between_profiles

run_profile 50
pause_between_profiles

run_profile 100

clear_profile

log "Full experiment finished."
log "Profile windows saved to: $WINDOWS_FILE"
log "Logs saved to: $LOG_DIR"
```

ДОДАТОК Ж

Зразок панелі моніторингу метрик Grafana та конфігурації Prometheus

