

DOI: 10.18372/2310-5461.69.20951

УДК 004.45:004.9:621.39

**В. О. Гнатюк**, канд. техн. наук, доцент  
Державний університет «Київський авіаційний інститут»;  
ДержНДІ технологій кібербезпеки  
orcid.org/0000-0002-4916-7149  
e-mail: viktor.hnatiuk@npp.kai.edu.ua;

**Р. М. Гамрецький**, PhD аспірант  
Державний університет «Київський авіаційний інститут»  
orcid.org/0000-0001-5514-9783  
e-mail: roman.hamretskyi@npp.kai.edu.ua

## КОМПЛЕКСНА МОДЕЛЬ ОЦІНКИ ЯКОСТІ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ В ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ СИСТЕМАХ З УРАХУВАННЯМ ДИНАМІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ

### Вступ

Розвиток інформаційно-комунікаційних систем (ІКС) супроводжується зростанням складності їхньої архітектури, масштабуванням обчислювальних ресурсів та підвищенням вимог до продуктивності, надійності й безперервності функціонування. В умовах цифрової трансформації, поширення мобільних технологій п'ятого та шостого покоління, сервісів Інтернету речей (ІоТ), хмарних і віртуалізованих середовищ питання забезпечення високої якості програмного забезпечення (ПЗ) набуває стратегічного значення.

Якість ПЗ безпосередньо визначає ефективність функціонування ІКС, оскільки від неї залежать ключові показники роботи систем: надійність передавання даних, пропускна здатність, затримка, стійкість до навантажень та масштабованість. У міжнародній практиці сформувалися стандартизовані підходи до оцінювання якості ПЗ, зокрема модель ISO/IEC 25010, що забезпечує формалізоване визначення функціональних і нефункціональних характеристик. Однак швидкий розвиток телекомунікаційних технологій, поява розподілених архітектур і критично навантажених сервісів зумовлюють необхідність переосмислення традиційних методик оцінки.

Значущим викликом є поєднання класичних статичних характеристик та їх метрик із показниками, що відображають реальну поведінку програмних компонентів у динамічному середовищі. Це актуалізує потребу у створенні комплексних моделей оцінювання, здатних інтегрувати різні групи метрик, відображати багатфакторність експлуатації та підтримувати прийняття рішень у процесах супроводу й розвитку ПЗ.

У цьому контексті запропонована робота спрямована на формування комплексної моделі оцінки якості ПЗ для ІКС, яка поєднує статичні

та динамічні метрики та орієнтована на практичне застосування в умовах сучасних телекомунікаційних і розподілених середовищ.

### Постановка проблеми

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 – тобто на ключові показники ефективності ІКС.

Наявні методи оцінки якості ПЗ, зокрема ті, що базуються на стандарті ISO/IEC 25010, орієнтовані переважно на статичні метрики, які відображають характеристики цієї моделі якості, і не враховують змінність умов експлуатації ПЗ у реальному середовищі. Як наслідок, оцінка якості не завжди є репрезентативною для ІКС, у яких значну роль відіграють динамічні метрики, зокрема: час реакції, втрати пакетів, продуктивність у реальному часі, адаптивність до змін конфігурації тощо.

Ці аспекти особливо актуальні для таких категорій ПЗ, як програмні елементи ядра 5G, платформи для Інтернету речей (ІоТ), програмно-конфігуровані мережі (SDN) і віртуалізовані мережеві функції (NFV), де динамічне середовище експлуатації є нормою.

Таким чином, існує потреба у розробці комплексної моделі оцінки якості ПЗ, яка б: поєднувала класичні (статичні) та динамічні показники якості, дозволяла адаптацію до конкретних типів ІКС, могла бути реалізована у вигляді інструментарію для підтримки прийняття рішень щодо якості ПЗ на різних етапах його життєвого циклу.

### Аналіз останніх досліджень та публікацій

Оцінка якості ПЗ в ІКС традиційно базується на стандартизованих підходах, зокрема на моделі ISO/IEC 25010, яка в оновленій редакції 2023 року визначає дев'ять характеристик якості, що охоплюють як функціональні, так і нефункціональні аспекти ПЗ [1]. Водночас ISO/IEC 25010 є моделлю якості (референтною схемою характеристик і підхарактеристик) і не встановлює конкретних методів чи виключно «статичної» процедури оцінювання; тому динамічні/адаптивні підходи під час експлуатації залишаються поза детальною регламентацією стандарту.

На рівні вимірювання якості програмного продукту та якості у використанні в межах сімейства SQuaRE визначено низку стандартів, що безпосередньо містять формалізовані метрики. Зокрема, ISO/IEC 25022 регламентує показники якості у використанні (задоволеність користувачів, ефективність виконання завдань, відмовостійкість з погляду користувача тощо) [2]. Тоді як ISO/IEC 25023 описує метрики якості програмного продукту (зокрема функціональне покриття, керованість доступу, зчеплення компонентів, адаптивність до апаратного середовища та інші показники, пов'язані з характеристиками моделі ISO/IEC 25010) [3]. У подальшому саме ці стандарти доцільно розглядати як базове джерело узагальнених метрик, що можуть бути адаптовані до специфіки ІКС та використані для побудови інтегральних показників якості ПЗ.

У публікації [4] подано огляд та аналіз методів і моделей оцінки якості ПЗ в ІКС, що дозволяє систематизувати наявні підходи та визначити їхні обмеження.

У дослідженнях [5–6] розглядаються підходи, релевантні до адаптивного забезпечення якості з акцентом на виконання та мережеві умови. Зокрема, у [5] запропоновано параметричну модель для оцінки продуктивності сервісів телекомунації над 5G, яка поєднує показники QoS та їхній вплив на QoE. Підхід дає змогу специфікувати політику QoS (зокрема через мережеве розділення) для забезпечення умов дистанційного керування. Робота [6] доповнює контекст, пропонуючи механізми динамічного керування QoS та підвищеної програмованості ядра 5G/6G (включно з керуванням слайсами), що є інструментальною основою для політик QoS у подібних сценаріях. У цьому ж контексті [7] розроблено метод оцінювання якості ПЗ ядра 5G, який враховує специфіку ІКС та особливості функціонування телекомунікаційних систем нового покоління.

Щодо динамічного оцінювання якості ПЗ, дослідження [8] здійснює систематичне карту-

вання динамічних метрик ПЗ, підкреслюючи їхню роль у відображенні реальної поведінки програм під час виконання та вказуючи на прогалини порівняно з домінуванням статичних метрик. Додатково у [9–10] наведено огляди методів динамічного аналізу та порівняння статичних і динамічних метрик зчеплення, що підкреслює користь рантайм-вимірювань для точнішого відображення внутрішньої якості ПЗ під час виконання.

Підхід, запропонований у [11], ґрунтується на нечіткій логіці та шкалі Лайкерта для аналізу вимог до якості відповідно до ISO/IEC 25010, що підвищує адаптивність і чутливість оцінювання.

Таким чином, аналіз сучасних джерел дозволяє виявити кілька прогалин: відсутність єдиної узагальненої моделі, що поєднує статичні та динамічні характеристики якості; недостатнє врахування специфіки ПЗ для ІКС у сучасних стандартах; потреба в адаптивних, контекстно-чутливих методиках оцінки.

Ці аспекти визначають наукову і практичну доцільність розробки комплексної моделі, що враховує динамічні параметри функціонування ПЗ в ІКС.

*Метою дослідження* є розробка комплексної моделі оцінки якості ПЗ для ІКС, яка поєднує статичні та динамічні метрики якості відповідно до сучасних вимог функціонування ПЗ в умовах змінного навантаження, розподіленої архітектури та високих вимог до надійності, продуктивності й масштабованості.

### Виклад основного матеріалу

Сучасні ІКС характеризуються високою складністю архітектур, розподіленістю обчислювальних ресурсів, інтенсивним потоком даних і потребою в адаптивному управлінні якістю сервісу. В таких умовах класичні підходи до оцінки якості ПЗ, засновані переважно на статичних характеристиках (наприклад, на відповідності функціональним вимогам або модульності коду), є недостатніми. Це обумовлює необхідність включення динамічних метрик, що відображають поведінку ПЗ під час реального функціонування в ІКС.

З огляду на сформульовану проблему та виявлені обмеження існуючих підходів, у даній роботі запропоновано комплексну модель оцінки якості ПЗ в ІКС, яка поєднує: (1) статичні характеристики якості згідно з моделлю ISO/IEC 25010:2023 (зокрема, функціональну придатність, надійність, безпеку, супроводжуваність тощо), що кількісно оцінюються за допомогою відповідних метрик із сімейства стандартів SQuaRE (передусім ISO/IEC 25022 та ISO/IEC 25023); (2) набір динамічних операційних мір якості, узгоджених насамперед із характеристиками ефек-

тивності функціонування та надійності: середню затримку обробки запитів, варіативність затримки, пропускну здатність, адаптивність до змін середовища (зокрема, зміни навантаження, топології, QoS-вимог), стабільність поведінки в умовах обмежених ресурсів.

Зазначені динамічні показники є авторськими метриками, які не входять безпосередньо до складу стандартів ISO/IEC 2502x, але концептуально відповідають характеристикам ефективності функціонування та надійності моделі ISO/IEC 25010 і за змістом є аналогами метрик середнього часу реакції системи та середнього завантаження процесора, визначених у ISO/IEC 25023.

Модель побудована за модульним принципом і передбачає багаторівневу оцінку якості:

1. Базовий рівень – здійснюється первинна оцінка за класичними статичними метриками.

2. Динамічний рівень – здійснюється моніторинг та реєстрація поведінкових показників ПЗ у контрольованому середовищі (тестовий стенд або емулятор ІКС).

3. Агрегований рівень – розраховується зважений інтегральний індекс якості на основі нормованих статичних і динамічних показників.

*Математичний опис запропонованої моделі інтегральної оцінки якості ПЗ для ІКС.*

1. Загальний підхід до моделювання. Інтегральна оцінка якості ПЗ  $Q_{total}$  розраховується на основі двох основних груп метрик:

Статичні метрики якості  $Q_{static}$  – оцінюють внутрішні характеристики ПЗ, такі як функціональність, зручність використання, підтримувальність, портативність тощо (відповідно до ISO/IEC 25010).

Динамічні метрики якості  $Q_{dynamic}$  – відображають поведінку ПЗ під час його роботи: затримка, пропускну здатність, стабільність, відмовостійкість тощо.

Формула інтегральної оцінки якості:

$$Q_{total} = \alpha \cdot Q_{static} + \beta \cdot Q_{dynamic}, \text{ де } \alpha + \beta = 1, \quad (1)$$

де  $\alpha$ ,  $\beta$  – вагові коефіцієнти, що визначають вплив кожного компоненту на загальну оцінку якості.

2. Формалізація статичних метрик. Нехай є набір  $n$  статичних метрик  $s_1, s_2, \dots, s_n$ , нормалізованих у межах  $[0; 1]$ .

$$Q_{static} = \sum_{i=1}^n w_i \cdot s_i, \quad \sum_{i=1}^n w_i = 1, \quad (2)$$

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

Наприклад:

$s_1$  – нормалізоване значення метрики функціонального покриття (метрика FCr-1-G) для підхарактеристики функціональна повнота;

$s_2$  – нормалізоване значення метрики керування доступу (метрика SCo-1-G) для підхарактеристики конфіденційність;

$s_3$  – нормалізоване значення метрики зчеплення компонентів (метрика MMo-1-G) для підхарактеристики модульність;

$s_4$  – нормалізоване значення метрики адаптивності до апаратного середовища (метрика PAd-1-G) для підхарактеристики адаптивність.

3. Формалізація динамічних метрик. Для  $m$  динамічних метрик (наприклад: затримка  $d_1$ , пропускну здатність  $d_2$ , втрати пакетів  $d_3$ ):

$$Q_{dynamic} = \sum_{j=1}^m v_j \cdot d'_j, \quad \sum_{j=1}^m v_j = 1, \quad (3)$$

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

Нормалізація прикладів: для затримки (менше – краще):

$$d'_1 = 1 - \frac{d_1 - d_{\min}}{d_{\max} - d_{\min}}, \quad (4)$$

для пропускну здатності (більше – краще):

$$d'_2 = \frac{d_2 - d_{\min}}{d_{\max} - d_{\min}}, \quad (5)$$

для втрат (менше – краще):

$$d'_3 = 1 - \frac{d_3 - d_{\min}}{d_{\max} - d_{\min}}. \quad (6)$$

4. Загальний інтегральний індекс. Підставляючи обидві складові, отримаємо:

$$Q_{total} = \alpha \cdot \left( \sum_{i=1}^n w_i \cdot s_i \right) + \beta \cdot \left( \sum_{j=1}^m v_j \cdot d'_j \right). \quad (7)$$

Ця модель дозволяє адаптувати оцінку якості до конкретного середовища, типу ПЗ або критичності його призначення.

*Практичний приклад розрахунку інтегральної оцінки якості ПЗ із формалізованим підходом.*

Розглянемо приклад застосування моделі для оцінки програмного компонента – SDN-контролера, що використовується в ІКС.

1. Статичні метрики. Оцінимо 4 ключові статичні характеристики (табл. 1) (усі значення нормалізовано до  $[0; 1]$ ).

Таблиця 1

## Оцінка статичних характеристик якості ПЗ на основі метрик ISO/IEC 25022 та ISO/IEC 25023

Характеристика якості (ISO/IEC 25010:2023)	Підхарактеристика якості	Метрика якості (ISO/IEC 25022, ISO/IEC 25023)	Позначення	Значення/ Міра якості	Вага $w_i$
Функціональна придатність (Functional suitability)	Функціональна повнота (Functional completeness)	Функціональне покриття (FCp-1-G)	$s_1$	0,85	0,3
Безпека (Security)	Конфіденційність (Confidentiality)	Керованість доступу (SCo-1-G)	$s_2$	0,75	0,25
Супроводжуваність (Maintainability)	Модульність (Modularity)	Зчеплення компонентів (MMo-1-G)	$s_3$	0,80	0,25
Переносимість (Portability)	Адаптивність (Adaptability)	Адаптивність до апаратного середовища (PAAd-1-G)	$s_4$	0,70	0,2

$$Q_{static} = 0.3 \cdot 0.85 + 0.25 \cdot 0.75 + 0.25 \cdot 0.80 + 0.2 \cdot 0.70 = 0.255 + 0.1875 + 0.2 + 0.14 = 0.7825. \quad (8)$$

2. Динамічні метрики. Розглядаємо три метрики в умовах середнього навантаження (50 %), при таких фактичних значеннях (табл. 2).

Таблиця 2

## Метрики в умовах середнього навантаження

Метрика	Позначення	Значення	Вага $v_j$	Формула нормалізації	Нормалізоване значення $d'_j$
Затримка (мс)	$d_1$	25	0,4	$1 - \frac{d-10}{45-10}$	0,571
Пропускна здатність	$d_2$	760	0,4	$\frac{d-650}{850-650}$	0,55
Втрати пакетів (%)	$d_3$	0,8	0,2	$1 - \frac{d-0}{2.1-0}$	0,619

$$Q_{dynamic} = 0,4 \cdot 0,571 + 0,4 \cdot 0,55 + 0,2 \cdot 0,619 = 0,2284 + 0,22 + 0,1238 = 0,5722. \quad (9)$$

$$Q_{total} = 0,6 \cdot 0,7825 + 0,4 \cdot 0,5722 = 0,6984. \quad (10)$$

3. Інтегральна оцінка якості. Нехай ваги компонентів:  $\alpha = 0,6$ ,  $\beta = 0,4$  (оскільки для системи важливі як функціональні, так і поведінкові характеристики):

Отримане значення свідчить про задовільний рівень якості, проте за умов підвищеного навантаження компонент може потребувати доопрацювання з метою покращення динамічної поведінки (рис. 1).

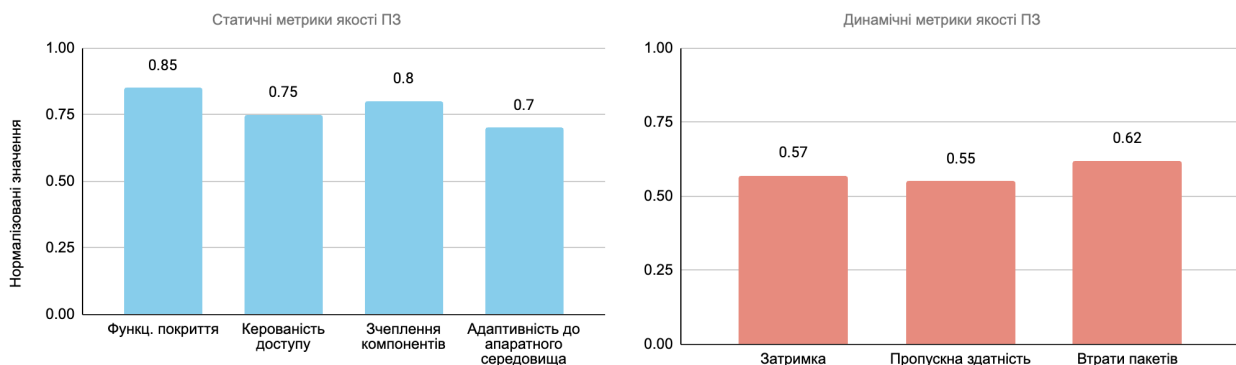


Рис. 1. Візуалізація нормалізованих значень метрик якості ПЗ – окремо для статичних і динамічних метрик

Кругова діаграма (рис. 2) демонструє внесок статичних і динамічних метрик у загальну інте-

гральну оцінку якості ПЗ. Це дозволяє наочно показати структуру оцінки та підкреслити важливість обох компонентів.

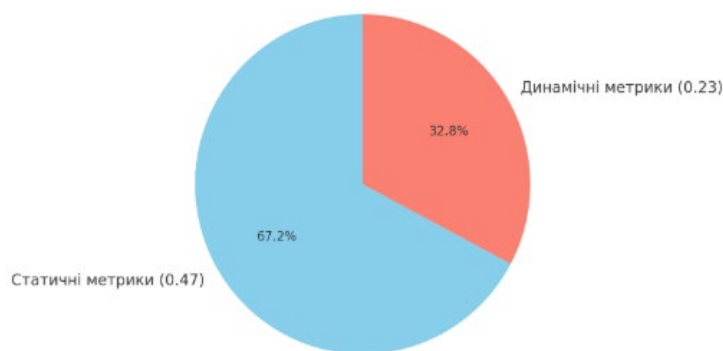


Рис. 2. Інтегральна оцінка якості ПЗ

Порівняльна діаграма інтегральної оцінки якості ПЗ для трьох умовних SDN-контролерів (рис. 3) демонструє, як різні співвідношення ста-

тичних і динамічних метрик впливають на загальний результат.

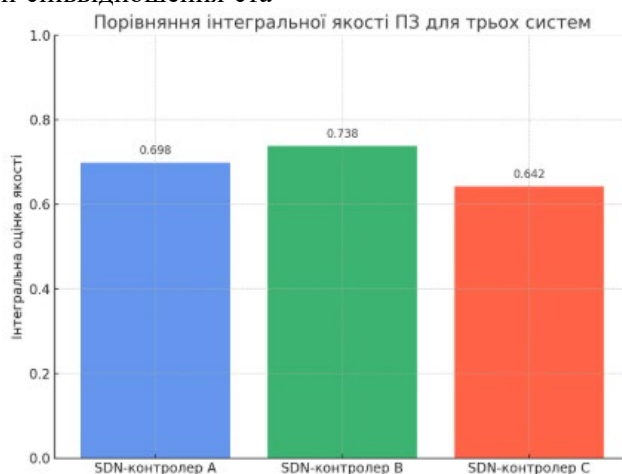


Рис. 3. Порівняння інтегральної якості ПЗ для трьох систем

Для валідації запропонованої моделі оцінки якості ПЗ було створено експериментальне середовище у віртуалізованій інфраструктурі на базі Proxmox VE. Усередині гіпервізора було розгорнуто п'ять віртуальних машин із чітко визначеними ролями:

1. RouterVM – шлюзовий вузол із встановленим модулем NetEm для емуляції мережевих умов (затримки, втрати пакетів, обмеження пропускної здатності). Зміна параметрів здійснювалася сценарієм *set\_profile.sh*, що дозволяло швидко переключати профілі навантаження (10 %, 50 %, 100 %).

2. SDN VM – контролер на базі OpenDaylight, розгорнутий у середовищі Karaf, який надавав RESTCONF API та експортував власні метрики через кастомний Prometheus-експортер.

3. Auth VM – мікросервіс аутентифікації користувачів, реалізований на Java Spring Boot, із інтеграцією Actuator для збору показників продуктивності (латентність запитів, кількість транзакцій, RPS).

4. IoT VM – компонент збору телеметрії, розроблений на Node.js із використанням протоколу MQTT. Він генерував повідомлення (наприклад,

дані сенсорів температури), передавав їх через брокер Mosquitto та експортував статистику у форматі Prometheus.

5. Monitoring VM – підсистема збору та візуалізації, що поєднувала Prometheus і Grafana з використанням спеціалізованих експортерів (*odl\_exporter.py*, *exp\_exporter.py*).

Для уніфікації аналізу було визначено три ключові динамічні метрики:

- Затримка (мс) – середній час відповіді сервісу:
  - SDN – *odl\_restconf\_latency\_seconds*;
  - Auth – співвідношення *http\_server\_requests\_seconds\_sum / count*;
  - IoT – *iot\_message\_latency\_ms*.
- Пропускна здатність (зап./с) – кількість успішно оброблених запитів/повідомлень за секунду:
  - SDN – *odl\_restconf\_fetch\_total*;
  - Auth – *http\_server\_requests\_seconds\_count*;
  - IoT – *iot\_messages\_total*.
- Втрати пакетів (%) – моделювалися засобами NetEm та фіксувалися через метрику *experiment\_packet\_loss\_percent* (для кожного з трьох сервісів окремо).

Збір даних здійснювався у Prometheus, після чого результати агрегувалися та візуалізувалися у Grafana. На рис. 4 подано часові ряди трьох ключових характеристик – затримки (Latency),

пропускної здатності (Throughput) та втрат пакетів (Loss) – для SDN-контролера, мікросервісу авторизації та IoT-компонента.

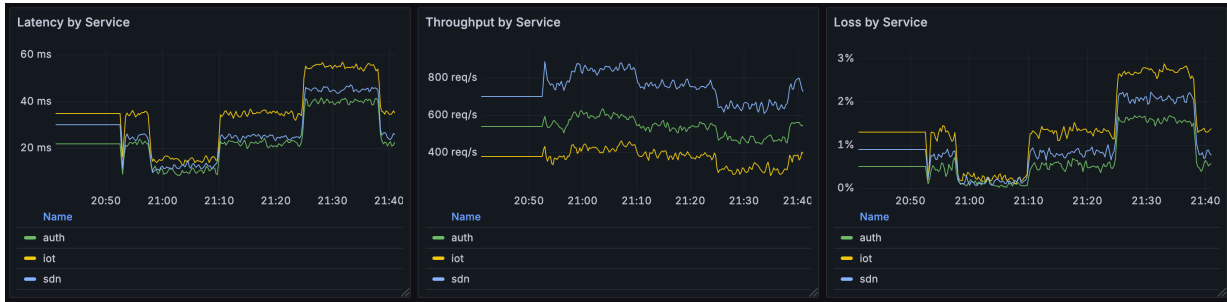


Рис. 4. Динаміка зміни метрик продуктивності ПЗ

Аналіз отриманих графіків свідчить, що із зростанням навантаження відбувається закономірне погіршення показників: середній час відповіді збільшується, пропускна здатність поступово знижується, а рівень втрат пакетів зростає. При цьому спостерігаються відмінності між типами сервісів. Зокрема, SDN-контролер зберігає найвищу продуктивність за рахунок оптимізації обробки запитів, але втрачає стабільність при перевищенні порогових значень навантаження. IoT-компонент демонструє найбільшу чутливість до зміни умов і характеризується різкими стрибками затримок та втрат. Мікросервіс авторизації

виявляється найбільш збалансованим – затримки зростають повільніше, втрати залишаються на відносно низькому рівні, а пропускна здатність знижується поступово.

Таким чином, динамічні метрики дозволяють виявити критичні сценарії деградації якості та відмінності в стійкості різних типів ПЗ.

На рисунку (рис. 5) наведено таблицю із Grafana де усереднені значення динамічних показників, що відображають якість функціонування досліджуваних програмних компонентів для одного із профілів навантаження в режимі реального часу.

Metrics Table			
Service ↓	Latency (ms)	Throughput (req/s)	Loss (%)
sdn	28.0 ms	730 req/s	0.974%
iot	34.4 ms	388 req/s	1.27%
auth	19.4 ms	533 req/s	0.676%

Рис. 5. Агреговані значення динамічних метрик

Процедура експерименту:

- Початковий профіль (10 %) – мінімальне навантаження, невелика затримка, стабільна пропускна здатність.
- Середній профіль (50 %) – інтенсивне навантаження, збільшення затримки й втрат, зниження RPS.

Максимальний профіль (100 %) – критичний сценарій: суттєве падіння пропускної здатності, латентність у кількадесят мс, втрати >2 %.

Перемикання профілів здійснювалося сценарієм `set_profile.sh` (скрипт), який одночасно оновлював NetEm-параметри та генерував відповідні значення у кастомних експортерах для узгодження з моделлю.

Таблична форма результатів експерименту (табл. 3) демонструє зміни динамічних метрик якості ПЗ залежно від рівня навантаження.

Таблиця 3

Результати оцінки динамічних метрик якості ПЗ в умовах змінного навантаження

Тип ПЗ	Рівень навантаження (%)	Затримка (мс)	Пропускна здатність (зап./с)	Втрата пакетів (%)	Динамічна оцінка якості ( $Q_{dynamic}$ )
SDN-контролер	10	12	850	0,1	0,82
	50	25	760	0,8	0,68
	100	45	650	2,1	0,57

Закінчення таблиці 3

Тип ПЗ	Рівень навантаження (%)	Затримка (мс)	Пропускна здатність (зап./с)	Втрата пакетів (%)	Динамічна оцінка якості ( $Q_{dynamic}$ )
Мікросервіс авторизації	10	10	600	0,0	0,85
	50	22	540	0,5	0,74
	100	40	470	1,6	0,65
IoT-компонент	10	15	430	0,2	0,78
	50	35	380	1,3	0,63
	100	55	300	2,7	0,52

Оцінка  $Q_{dynamic}$  нормалізована за шкалою [0–1] на основі обернених значень затримки, втрат пакетів та прямої пропорційності до пропускної здатності.

Для перевірки моделі було створено експериментальний стенд на базі середовища віртуалізації з підтримкою емуляції мережевих характеристик (затримка, втрати пакетів тощо). Випробування проводились на трьох типових варіантах ПЗ для ІКС: ПЗ керування маршрутизатором (SDN-контролер); мікросервіс аутентифікації користувача; компонент обробки телеметрії в IoT-мережі.

Результати експериментів показали, що динамічні метрики можуть змінюватися до 30–50 % при варіації вхідного навантаження, тоді як статичні метрики залишаються незмінними. Це підтверджує необхідність включення динамічної компоненти в модель оцінки якості.

Також було протестовано механізм адаптивного вагового коригування: у випадку критичних сценаріїв (наприклад, стрибок затримки понад порогове значення) вага динамічної складової автоматично збільшується, що дозволяє швидше виявити деградацію якості ПЗ ще до повного виходу з ладу системи.

### Висновки

У ході дослідження було розроблено та апробовано модель інтегральної оцінки якості ПЗ в ІКС, яка поєднує як статичні, так і динамічні метрики. Основні результати дослідження:

1. Запропоновано формалізовану модель, яка дозволяє обчислювати інтегральний показник якості ПЗ на основі вагового поєднання статичних і динамічних метрик. Це забезпечує гнучке налаштування моделі відповідно до критичності застосування програмного компонента.

2. Динамічні метрики, такі як затримка, втрати пакетів і пропускна здатність, мають суттєвий вплив на загальну якість ПЗ в умовах високого навантаження. Дослідження показало, що лише статична оцінка може призвести до хибного уявлення про придатність ПЗ у виробничому середовищі.

3. Експериментальні результати засвідчили, що зростання навантаження до 100 % призводить

до зниження динамічної оцінки якості в середньому на 25–35 %, що є критичним для систем реального часу або критичних ІКС.

4. Адаптивне коригування ваг коефіцієнтів дозволяє більш ефективно виявляти ситуації деградації якості, підвищуючи оперативність реагування на потенційні збої або загрозу недотримання SLA.

5. Запропонований підхід може бути інтегрований в CI/CD-процеси як додатковий механізм контролю якості релізів ПЗ в телекомунікаційних, IoT- та хмарних ІКС.

Ці результати можуть бути подальшою основою для автоматизованих систем прийняття рішень щодо розгортання, масштабування або оновлення компонентів ПЗ в умовах змінного середовища.

### ЛІТЕРАТУРА

- [1] ISO/IEC 25010:2023. Systems and software engineering – Systems and software Quality Requirements and Evaluation (SQuaRE) – Product quality model. Geneva: ISO, 2023. URL: <https://www.iso.org/standard/78176.html>. (access data 01.10.2025)
- [2] ISO/IEC 25022:2016. Systems and software engineering – Systems and software Quality Requirements and Evaluation (SQuaRE) – Measurement of quality in use. Geneva: ISO, 2016. URL: <https://www.iso.org/standard/35746.html>. (access data 01.10.2025)
- [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: ISO, 2016. URL: <https://www.iso.org/standard/35747.html>. (access data 01.10.2025)
- [4] 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: 10.18372/2310-5461.63.19752
- [5] Pérez P., Ruiz J., Benito I., et al. A parametric quality model to evaluate the performance of teleoperated driving services over 5G networks. *Multimedia Tools and Applications*. 2022. Vol. 81. P. 12287–12303. doi:10.1007/s11042-021-11251-x.

- [6] 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. P. 2849. doi:10.3390/s22082849.
- [7] 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: 10.31891/2307-5732-2025-355-15.
- [8] 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>.
- [9] Kuliain V. V. A Survey of Software Dynamic Analysis Methods. *Programming and Computer Software*. 2024. Vol. 50, № 1. P. 90–114. doi: 10.1134/S0361768824010079
- [10] Schnoor H., Hasselbring W. Comparing Static and Dynamic Weighted Software Coupling Metrics. *Computers*. 2020. Vol. 9, No. 2. P. 24. doi:10.3390/computers9020024.
- [11] 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 (IJACSA)*. 2016. Vol. 7, No. 12. doi: 10.14569/IJACSA.2016.071232.

**Гнатюк В. О., Гамрецький Р. М.**

### **КОМПЛЕКСНА МОДЕЛЬ ОЦІНКИ ЯКОСТІ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ В ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ СИСТЕМАХ З УРАХУВАННЯМ ДИНАМІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ**

У статті розглянуто проблему комплексного оцінювання якості програмного забезпечення (ПЗ) в інформаційно-комунікаційних системах (ІКС), що функціонують у динамічно змінних умовах навантаження та розподілених архітектурах. Актуальність теми зумовлена обмеженістю традиційних підходів, зокрема стандарту ISO/IEC 25010:2023, який орієнтований переважно на статичні характеристики й не відображає повною мірою поведінку ПЗ у реальному середовищі. Це створює розрив між формально задекларованою якістю та фактичними експлуатаційними показниками, що є критичним для 5G/6G-мереж, середовищ SDN/NFV та IoT.

Метою дослідження є розробка моделі оцінювання, що поєднує статичні та динамічні метрики і дозволяє формувати інтегральний показник якості. Запропоновано багаторівневий підхід: базовий рівень забезпечує оцінку за статичними метриками стандарту; динамічний рівень передбачає моніторинг таких характеристик, як затримка, пропускна здатність, втрати пакетів і стабільність; агрегований рівень формує інтегральний індекс із можливістю адаптивного коригування вагових коефіцієнтів.

Валідацію моделі проведено у віртуалізованому середовищі Proxтох VE. Експеримент охопив три типові компоненти: SDN-контролер OpenDaylight, мікросервіс автентифікації на Spring Boot та IoT-збирач телеметрії. Для імітації навантаження використано NetEm, а для збору й візуалізації метрик – Prometheus і Grafana. Результати показали, що зі зростанням навантаження динамічні метрики знижуються на 25–35 %. IoT-компонент виявився найбільш чутливим до деградації, SDN-контролер забезпечив високу продуктивність, але втратив стабільність при критичних навантаженнях, а сервіс автентифікації продемонстрував збалансовану роботу.

Отримані результати підтверджують доцільність поєднання статичних і динамічних характеристик у єдиній моделі та доводять її практичну цінність. Запропонований підхід може інтегруватися у CI/CD-процеси та системи експлуатаційного моніторингу для раннього виявлення деградацій, зменшення ризику порушення SLA і підтримки рішень щодо розгортання, масштабування та оновлення ПЗ.

**Ключові слова:** якість програмного забезпечення, динамічні метрики, надійність, продуктивність, інтегральна оцінка.

**Gnatyuk V., Hamretskyi R.**

### **A COMPREHENSIVE MODEL FOR SOFTWARE QUALITY ASSESSMENT IN INFORMATION AND COMMUNICATION SYSTEMS CONSIDERING DYNAMIC PARAMETERS**

The paper addresses the problem of comprehensive assessment of software quality in information and communication systems (ICS) that operate under dynamic workloads and distributed architectures. The relevance is determined by the limitations of traditional approaches, notably ISO/IEC 25010:2023, which focus mainly on static characteristics and fail to reflect real runtime behavior. This results in a gap between declared quality and actual operational indicators such as latency, throughput, packet loss, and stability, which is particularly critical for 5G/6G networks, SDN/NFV infrastructures, and IoT platforms.

*The aim of the study is to develop an assessment model that integrates static and dynamic metrics into a single framework and provides an integral quality indicator. The proposed multi-level approach includes: a baseline level covering static metrics from the standard; a dynamic level monitoring latency, throughput, packet loss, and resilience; and an aggregated level producing an integral index with adaptive weighting depending on operational conditions.*

*Validation was carried out in a Proxmox VE virtualization testbed with three representative ICS components: an SDN controller (OpenDaylight), an authentication microservice (Spring Boot), and an IoT telemetry collector (Node.js/MQTT). Network load was emulated with NetEm, while Prometheus and Grafana were used for data collection and visualization. Results indicate that as load increases, dynamic quality metrics degrade by 25–35%. The IoT component was the most sensitive to performance decline, the SDN controller maintained high throughput but lost stability under critical load, and the authentication service exhibited balanced behavior.*

*The findings confirm the necessity of combining static and dynamic characteristics in a unified model and demonstrate its practical applicability. The approach can be integrated into CI/CD pipelines and observability systems for early detection of degradation, reduction of SLA violation risks, and support of deployment, scaling, and update decisions in modern ICS.*

**Keywords:** software quality; dynamic metrics; reliability; performance; integral assessment.

Дата першого надходження: 02.10.2025 р.

Дата прийняття до друку: 16.02.2026 р.

Дата публікації: 27.04.2026 р.