

УДК 621.3

DOI: 10.31673/2786-8362.2025.016443

Брезицький С.М.; Герасимчук В.С.

МЕТОДИКА ФОРМУВАННЯ ІНТЕГРАЛЬНИХ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ РОБОТИ МЕРЕЖЕВИХ З'ЄДНАНЬ В МЕРЕЖАХ З КОМУТАЦІЄЮ ПАКЕТІВ

Brezitskyi S.M., Herasymchuk V.S. Methodology for forming integral indicators of network connection quality in packet-switched networks. The article addresses quality assurance in packet-switched telecommunication systems. Growing network traffic and higher QoS demands challenge operators with the complexity of comprehensively evaluating network connections across multiple parameters (delay, packet loss, error rate, jitter).

The research analyzes existing telecommunications studies and ITU-T recommendations Y.1540, Y.1564, and Y.1731, which define IP network quality indicators. Current evaluation methods, while effective, often lack assessment integrity, necessitating integral quality indicators.

The study aims to create integral indicator models accounting for synergistic relationships between network performance parameters. It develops indicators including throughput ratio (TR), priority queue quality factor (PQF), non-priority queue quality factor (NQF), and network connection quality factor (NCQF). Additionally, it proposes a "fault tree analysis" model to analyze performance deterioration causes.

These findings have practical applications in real-time monitoring, fault diagnosis, architecture optimization, and user need adaptation. The methodology offers flexibility and versatility for different network types and services, improving assessment accuracy and operational efficiency. This creates a foundation for more reliable, adaptive telecommunication systems meeting modern requirements.

Keywords: telecommunication networks, quality of network connections, integral indicators, network performance, delay, jitter, error rate, QoS, interconnection model, throughput, network monitoring, network optimisation, packet switching

Брезицький С.М., Герасимчук В.С. Методика формування інтегральних показників якості роботи мережеских з'єднань в мережах з комутацією пакетів. У статті запропоновано підхід до оцінки якості роботи мережеских з'єднань у телекомунікаційних системах на основі інтегральних показників, що враховують затримку, втрати, помилки, джитер та їх взаємозв'язки. Розроблено модель із показниками КПЗ, КЯПЧ, КЯНЧ і КЯМЗ, яка дозволяє проводити комплексний аналіз продуктивності мережі. Представлено метод діагностики за допомогою "дерева відмов", що сприяє підвищенню надійності та гнучкості мереж. Результати можуть застосовуватись для оптимізації та моніторингу сучасних телекомунікаційних мереж.

Ключові слова: телекомунікаційні мережі, якість мережеских з'єднань, інтегральні показники, продуктивність мереж, затримка, джитер, рівень помилок, QoS, модель взаємозв'язків, пропускну здатність, моніторинг мереж, оптимізація мережі, комутація пакетів

Вступ

У сучасних умовах розвитку інформаційних технологій і телекомунікаційних мереж забезпечення високої якості роботи мережеских з'єднань є критично важливим завданням. Використання інтернет-протоколів (IP) вимагає комплексного підходу до моніторингу та оцінки продуктивності мереж. Зростання обсягів мережевого трафіку, підвищення вимог до якості послуг зв'язку (Quality of Service, QoS) та енергетичної ефективності мереж створюють нові виклики для операторів зв'язку.

Основною проблемою є складність комплексного оцінювання якості мережеских з'єднань, що вимагає врахування різноманітних параметрів, таких як затримка передачі даних, втрата пакетів, рівень помилок, а також взаємозв'язок між цими показниками. Розробка інтегральних показників якості роботи мережеских з'єднань є важливим завданням для подальшого вдосконалення телекомунікаційних систем.

Аналіз останніх досліджень. Оцінка продуктивності телекомунікаційних мереж є багатогранною задачею. Сучасні дослідження у цій галузі базуються на міжнародних стандартах, рекомендаціях організацій ITU-T (International Telecommunication Union) та IETF (Internet Engineering Task Force), а також практичних результатах, отриманих шляхом впровадження інноваційних технологій. Рекомендації ITU-T Y.1540 визначають ключові пара-

метри, які впливають на якість надання послуг у IP-мережах: затримка, втрата пакетів, доступність і варіація затримки (джитер) [1]. Визначення цих параметрів є основою для оцінки QoS (Quality of Service) у будь-яких сучасних мережах. Рекомендація ITU-T Y.1564 доповнює Y.1540, пропонуючи детальний підхід до тестування Ethernet-сервісів із використанням реальних сценаріїв навантаження [2]. Дослідники відзначають, що розгляд окремих параметрів QoS не завжди дозволяє повністю оцінити якість роботи мережі. Для більш цілісного підходу пропонуються інтегральні моделі оцінки продуктивності. Наприклад, у роботі Jain і Hassan [3] розглянуто методи комбінованого аналізу затримок, втрат і завантаження мереж, які дозволяють створювати єдину оцінку стану мережевих з'єднань. Інтегральні підходи також підтримуються у дослідженнях Stallings, де наголошується на важливості використання моделей для передбачення продуктивності при зміні умов експлуатації мереж [4]. Особлива увага в сучасних дослідженнях приділяється впливу мережевої архітектури на продуктивність. У рекомендації ITU-T Y.1731 [5] розглядається можливість застосування функцій OAM (Operation, Administration, and Maintenance) для забезпечення надійності роботи Ethernet-мереж. Ці функції дозволяють діагностувати проблеми з'єднань у реальному часі та мінімізувати вплив несправностей на кінцевих користувачів.

Дослідження Cisco Systems [6] показують, що організація QoS є ключовим аспектом під час проектування мережевих рішень. У роботі наголошується, що коректна настройка пріоритетів трафіку, буферів та механізмів керування чергами є основою для досягнення стабільності мережі. Протоколи, такі як IETF RFC 2544 [7], задають методологію тестування мережевих пристроїв для визначення їх продуктивності в умовах реального навантаження. Сучасні дослідження підкреслюють важливість інтегральних моделей для забезпечення продуктивності мереж у різних умовах. Наприклад, Tanenbaum і Wetherall [8] аналізують особливості мережевого трафіку, враховуючи збільшення обсягів даних і потреби в адаптації до змін. Дослідження Medhi та Ramasamy [9] демонструють ефективність маршрутизації для зменшення затримок і втрат при зростанні трафіку в мережах.

Таким чином, сучасні дослідження пропонують різноманітні підходи до оцінки якості роботи мережевих з'єднань. Від нормативних стандартів до інноваційних протоколів і моделей – усі ці підходи спрямовані на підвищення ефективності та надійності мереж. Проте подальші дослідження повинні бути спрямовані на інтеграцію окремих параметрів у єдині показники для забезпечення більш точної та комплексної оцінки.

Метою роботи є розробка інтегральних показників якості роботи мережевих з'єднань для оцінки їхньої продуктивності в умовах сучасних вимог до телекомунікаційних систем. Для досягнення мети необхідно вирішити наступні задачі:

- Аналіз нормативної документації та існуючих підходів до оцінки якості мереж.
- Формалізація ключових показників продуктивності, таких як рівень завантаження, затримка, втрати та помилки.
- Розробка моделі взаємозв'язку показників мережевої продуктивності.
- Визначення інтегральних коефіцієнтів для оцінки продуктивності мережевих з'єднань.
- Обґрунтування можливості застосування запропонованих показників у реальних умовах.

Виклад основного матеріалу дослідження

Вивчення нормативної документації, що описує показники продуктивності мереж на основі IP-протоколів, дозволило визначити основні параметри, які впливають на якість роботи мережевих з'єднань. До них належать:

- Рівень доступності сервісу передачі даних – показник, який відображає здатність мережі забезпечувати безперервність надання послуг зв'язку. Цей показник залежить від наявності резервування мережевих з'єднань та можливості перенаправлення трафіку у разі виникнення несправностей.

- Рівень завантаження мережевого з'єднання – критичний параметр, що визначає частку використаних ресурсів мережі. Надмірне завантаження мережевих з'єднань призводить до збільшення затримки, втрат і помилок при передачі пакетів.
- Варіація часу затримки (джитер) – змінність затримки передачі пакетів, що особливо впливає на якість реального часу послуг, таких як голосовий зв'язок чи відеоконференції. Джитер виникає через нерівномірність у проходженні пакетів через мережу.
- Рівень помилок – частка пакетів, що були пошкоджені під час передачі, що може бути спричинено як апаратними проблемами, так і впливом зовнішніх факторів.
- Рівень втрат пакетів – показник, що відображає частку пакетів, які не були доставлені до пункту призначення через перевантаження, помилки або інші причини.
- Рівень дублювання та порушення порядку проходження пакетів – параметри, які виникають через повторну передачу пакетів або зміну їхнього порядку під час маршрутизації.

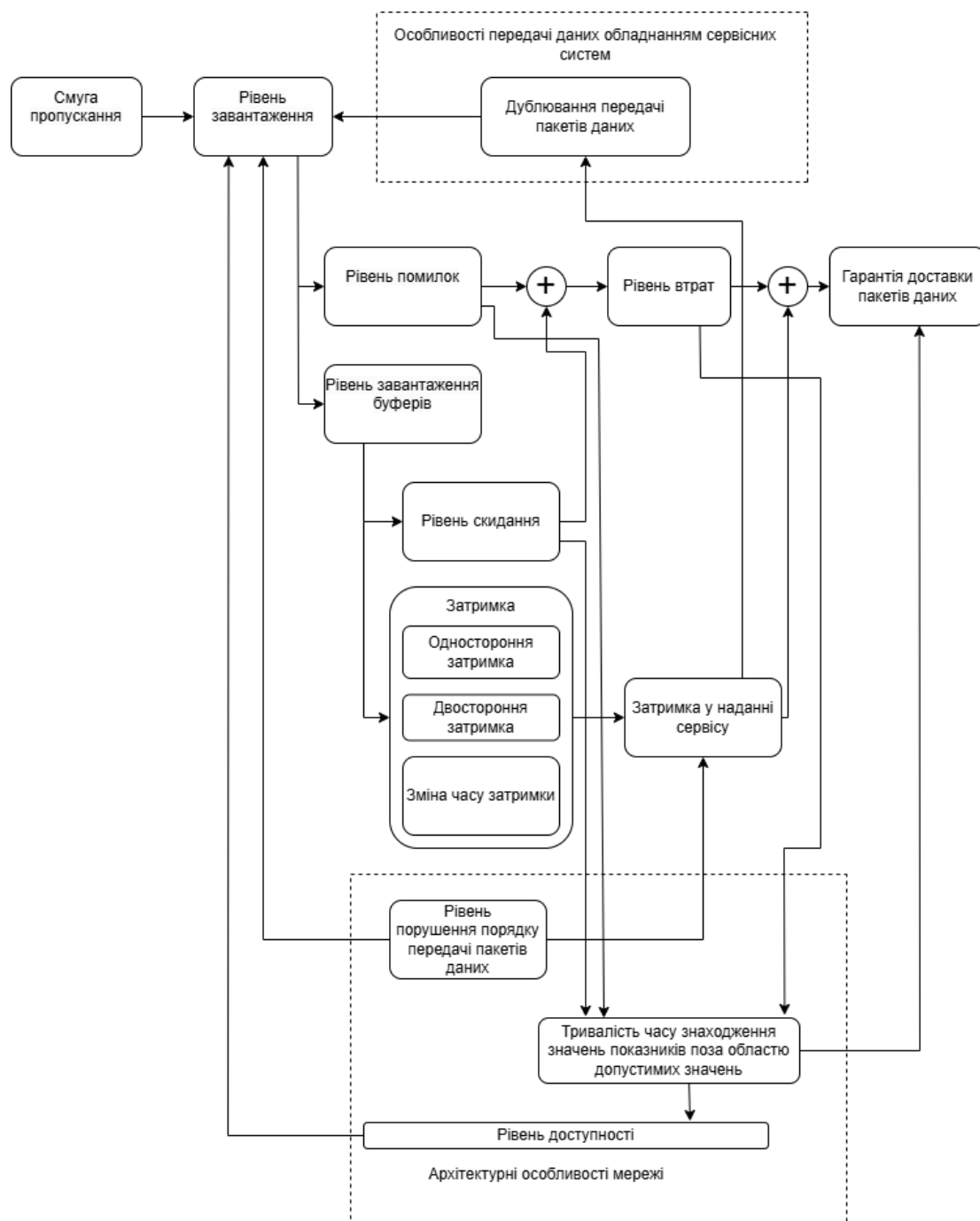


Рис. 1. Модель взаємовпливу показників ефективності функціонування мереж з комутацією пакетів

На основі цих показників було розроблено модель взаємозв'язку параметрів продуктивності мереж (рис. 1). Вона враховує синергетичний ефект, який виникає при взаємодії показників. Наприклад, підвищення рівня завантаження може призводити до зростання затримки та втрат пакетів, а це, у свою чергу, знижує рівень доступності та якості послуг зв'язку.

Для наочності модель представлена у вигляді «дерева відмов» (Fault Tree Analysis, FTA) (рис. 2). Це дозволяє аналізувати причини погіршення продуктивності мережі шляхом розгляду взаємозалежностей між різними параметрами. Наприклад, перевантаження буферів на мережевих пристроях може спричинити зростання затримки для пріоритетного трафіку або втрату пакетів для непрайоритетного трафіку.

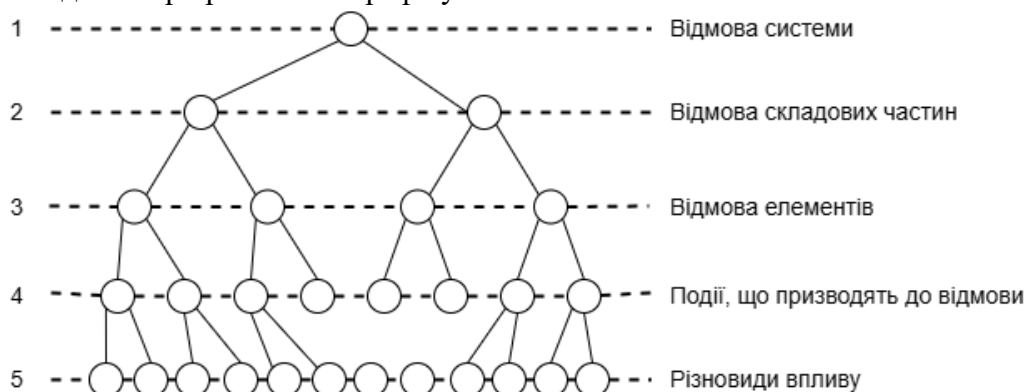


Рис. 2. Дерево відмов

Інтегральні показники якості роботи мереж. Аналіз нормативних і технічних документів показав, що для комплексного оцінювання якості мережевих з'єднань необхідно використовувати інтегральні показники, які враховують взаємозв'язки між ключовими параметрами. Розроблені показники базуються на оцінці таких характеристик.

Коефіцієнт пропускної здатності (КПЗ). Цей показник дозволяє оцінити запас пропускної здатності мережевого з'єднання, враховуючи рівень його завантаження. Формула розрахунку:

$$\text{КПЗ} = \left(1 - \left(\frac{S_U}{S_{Ut}} \right)^{e^{-(1-T_{thres}/T_{av})}} \right) * 100\%$$

Де:

S_U – фактичне інтегральне значення рівня завантаження;

S_{Ut} – максимальне можливе значення рівня завантаження;

T_{thres} – граничне значення часу доступності;

T_{av} – доступний час для передачі даних.

Цей коефіцієнт є ключовим для оцінки того, наскільки ефективно використовуються ресурси мережі.

Коефіцієнт якості пріоритетних черг (КЯПЧ). Дозволяє оцінити рівень втрат пакетів пріоритетного трафіку, який є критичним для забезпечення високої якості послуг реального часу.

$$\text{КЯПЧ} = \left(1 - \left(\frac{S_{PQ}}{S_{PQt}} \right)^{e^{-(1-T_{thres}/T_{av})}} \right) * 100\%$$

Де:

S_{PQ} – фактичне інтегральне значення втрат у пріоритетних чергах;

S_{PQt} – допустиме інтегральне значення втрат.

Коефіцієнт якості непрайоритетних черг (КЯНЧ). Аналогічний до КЯПЧ, цей показник використовується для оцінки втрат пакетів, що не належать до пріоритетного трафіку. Його значення є індикатором загальної стійкості мережі до перевантажень.

$$\text{КЯНЧ} = \left(1 - \left(\frac{S_{CQ}}{S_{CQt}} \right)^{e^{-(1-T_{thres}/T_{av})}} \right) * 100\%$$

Де:

S_{CQ} – фактичне інтегральне значення втрат у неперіоритетних чергах;

S_{CQt} – допустиме інтегральне значення втрат.

Коефіцієнт якості мережевого з'єднання (КЯМЗ). Цей інтегральний показник оцінює придатність мережевого з'єднання для надання різних типів послуг залежно від рівня помилок під час передачі пакетів:

$$\text{КЯМЗ} = \left(1 - \left(\frac{S_{LQ}}{S_{LQt}} \right)^{e^{-(1-T_{thres}/T_{av})}} \right) * 100\%$$

Де:

S_{LQ} – фактичне інтегральне значення рівня помилок;

S_{LQt} – граничне інтегральне значення рівня помилок.

Ці інтегральні показники забезпечують можливість отримання єдиної числової оцінки якості роботи мережевих з'єднань, що спрощує їхній аналіз та порівняння. Запропоновані інтегральні показники можуть бути використані для моніторингу та управління продуктивністю мереж у різних умовах. Наприклад:

- Оцінка продуктивності у реальному часі: Використання протоколу TWAMP [10] дозволяє здійснювати постійний моніторинг показників QoS, зокрема затримки, втрат і джитера. На основі цих даних можна формувати інтегральні показники КПЗ, КЯПЧ, КЯНЧ і КЯМЗ для кожного мережевого з'єднання.
- Діагностика мережевих несправностей: Завдяки моделі "дерева відмов" можна визначати причини погіршення якості послуг. Наприклад, якщо значення КЯПЧ знижується, це може свідчити про перевантаження пріоритетних черг або проблеми з маршрутизацією.
- Планування та оптимізація мережі: Інтегральні показники можуть бути використані для визначення слабких місць у мережі та обґрунтування рішень щодо її модернізації. Наприклад, низьке значення КПЗ може свідчити про необхідність збільшення пропускної здатності або впровадження технологій агрегації трафіку.
- Адаптація до вимог користувачів: Рівень завантаження та інші параметри можуть коригуватися залежно від типу послуг, які надаються користувачам. Наприклад, для відеоконференцій критичною є мінімальна затримка, а для передачі файлів – мінімальні втрати.

На основі запропонованих інтегральних показників можна формувати ключові показники ефективності (Key Performance Indicators, KPI) мереж (рис.3.). Наприклад:

- КПЗ використовується для оцінки завантаження мережі;
- КЯПЧ і КЯНЧ дозволяють аналізувати втрати трафіку;
- КЯМЗ оцінює стабільність і надійність мережі щодо помилок.

Використання цих показників забезпечує комплексний підхід до оцінки якості роботи мережевих з'єднань, що дозволяє своєчасно реагувати на зміни умов експлуатації та запобігати деградації якості послуг зв'язку.

Головними перевагами інтегральних показників є:

- Комплексність: враховуються всі основні параметри, що впливають на продуктивність мереж.
- Скалярна оцінка: забезпечується можливість отримання єдиної числової характеристики, що спрощує аналіз.
- Гнучкість: показники можна адаптувати до специфічних вимог різних типів мереж і послуг.

Таким чином, запропонований підхід дозволяє досягти високої точності в оцінці якості роботи мережевих з'єднань, що сприяє підвищенню ефективності їхнього функціонування.

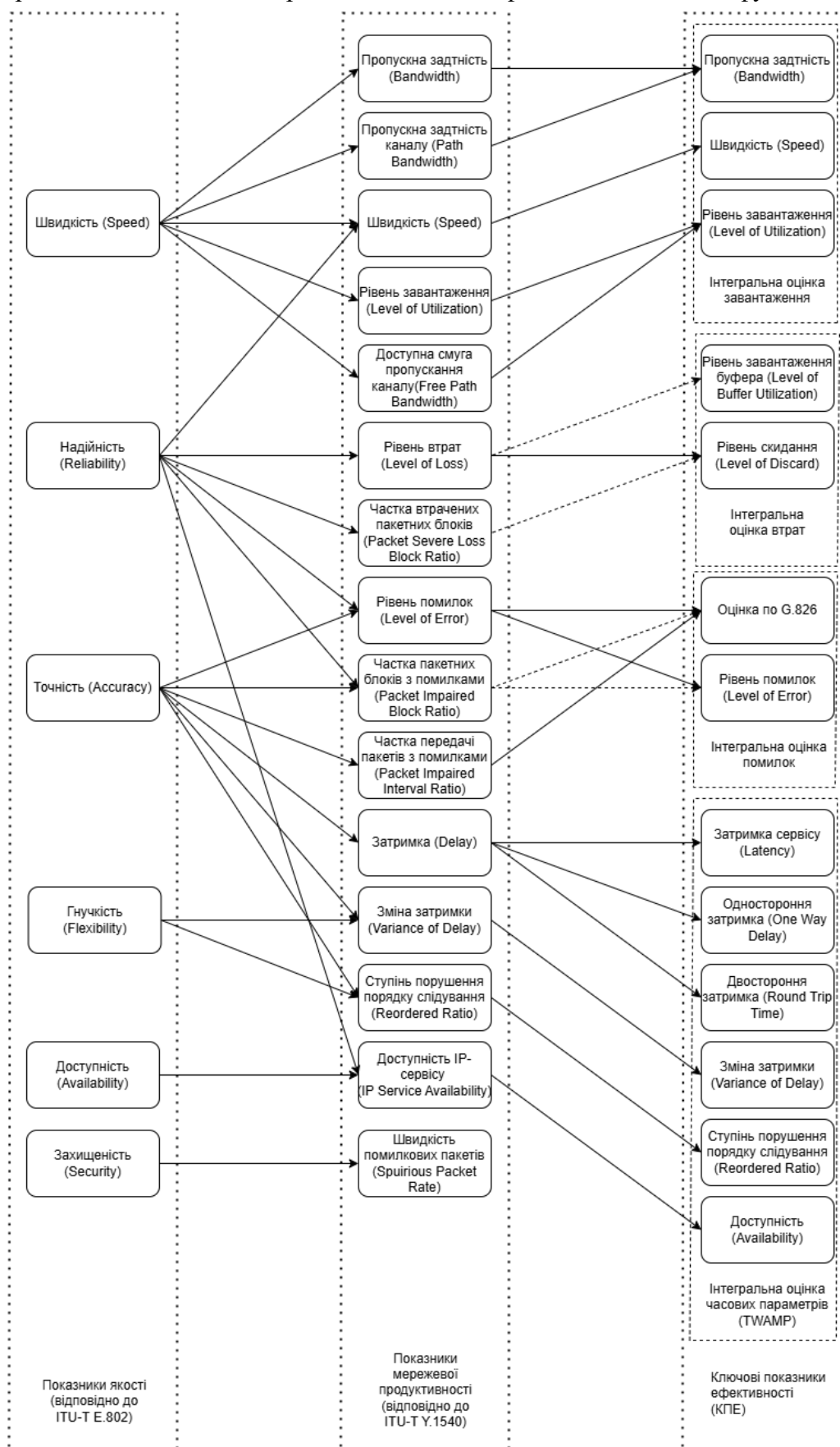


Рис. 3. Взаємозв'язок між стандартизованими параметрами якості та основними показниками продуктивності телекомунікаційної мережі

Висновки

Запропоновані інтегральні показники якості роботи мережевих з'єднань забезпечують комплексний підхід до оцінки продуктивності телекомунікаційних систем. Дана модель дозволяє враховувати взаємозв'язки між основними параметрами продуктивності мережі, такими як затримка, втрата пакетів, джитер, помилки та рівень завантаження. Це забезпечує комплексний підхід до аналізу якості. Запропоновані інтегральні коефіцієнти, такі як коефіцієнт пропускної здатності (КПЗ), якості пріоритетних (КЯПЧ) і непріоритетних (КЯНЧ) черг, а також якості мережевого з'єднання (КЯМЗ), дозволяють спростувати аналіз продуктивності та ефективності мереж. Використання інтегральних показників сприяє виявленню слабких місць у мережевій архітектурі, що може слугувати основою для подальшої оптимізації та модернізації мереж. Таким чином, запропонований підхід створює основу для створення більш стабільних, ефективних і гнучких телекомунікаційних мереж, що відповідають сучасним вимогам до якості послуг зв'язку.

Список використаної літератури:

1. Recommendation ITU-T Y.1540 (12/2019). Internet protocol data communication service – IP packet transfer and availability performance parameters. URL: <https://www.itu.int/rec/T-REC-Y.1540-201912-I/en>.
2. Recommendation ITU-T Y.1564 (02/2016). Ethernet service activation test methodology. URL: <https://www.itu.int/rec/T-REC-Y.1564-201602-I/en>.
3. High performance TCP/IP networking: concepts, issues, and solutions / H. Mahbub, J. Raj. Pearson Education, Limited, 2003. 408 p.
4. Stallings W. Data and computer communications, international edition. Pearson Education, Limited, 2015. 915 p.
5. Recommendation ITU-T Y.1731 (06/2023). Operation, administration and maintenance (OAM) functions and mechanisms for Ethernet-based networks. URL: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.8013-202306-I/en>.
6. Held G. Quality of service in a Cisco networking environment. Chichester : Wiley, 2002. 184 p.
7. IETF RFC 2544 (03/1999). *Benchmarking Methodology for Network Interconnect Devices*. Internet Engineering Task Force. URL: <https://www.ietf.org/rfc/rfc2544.txt>.
8. Tanenbaum A. S. Computer networks, 5th edition. PEARSON INDIA, 2013.
9. Ramasamy K., Medhi D. Network routing: algorithms, protocols, and architectures. Elsevier Science & Technology Books, 2017. 1018 p.
10. IETF RFC 5357 (12/2008). A Two-Way Active Measurement Protocol (TWAMP). URL: <https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc5357>.

Автори статті

Брезіцький Сергій – аспірант, Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій, Київ, Україна.

ORCID: 0009-0004-2562-890X

Герасимчук Владислав – аспірант, Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій, Київ, Україна.

ORCID: 0009-0003-8944-1952

Authors of the article

Brezitskyi Serhii – postgraduate, State University of Information and Communication Technologies, Kyiv, Ukraine.

ORCID: 0009-0004-2562-890X

Herasyimchuk Vladyslav – postgraduate, State University of Information and Communication Technologies, Kyiv, Ukraine.

ORCID: 0009-0003-8944-1952