

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ

Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису

ЄВДОКИМЕНКО МАРИНА ОЛЕКСАНДРІВНА

УДК 621.391

**ДИСЕРТАЦІЯ**  
ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ВІДМОВОСТІЙКОЇ МАРШРУТИЗАЦІЇ  
ЧУТЛИВОГО ДО ЗАТРИМОК ТА ВТРАТ ТРАФІКА В  
ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ МЕРЕЖАХ З ВИКОРИСТАННЯМ ТЕНЗОРНИХ  
МОДЕЛЕЙ І МЕТОДІВ

Спеціальність: 05.12.02 – телекомунікаційні системи та мережі

Галузь знань: 05 «Технічні науки»

Подається на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук

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

\_\_\_\_\_ М.О. Євдокименко

Науковий консультант: Лемешко Олександр Віталійович, доктор технічних наук,  
професор

Ідентичність всіх примірників дисертації засвідчую:

Учений секретар спеціалізованої вченої ради



/О.С. Єременко/

Харків – 2020

## АНОТАЦІЯ

Євдокименко М. О. Теоретичні основи відмовостійкої маршрутизації чутливого до затримок та втрат трафіка в телекомунікаційних мережах з використанням тензорних моделей і методів. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.12.02 «Телекомунікаційні системи та мережі». – Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, 2020.

Дисертаційна робота присвячена розв'язанню актуальної науково-прикладної проблеми, яка полягає в розвитку теорії відмовостійкої маршрутизації чутливого до затримок і втрат трафіку в напрямку забезпечення захисту рівня якості обслуговування як за множиною показників мережної продуктивності, так і за показниками якості сприйняття користувачем.

В ході дослідження тенденцій розвитку телекомунікацій встановлено: рівень вимог щодо забезпечення якості обслуговування, надійності та відмовостійкості ТКМ постійно зростає, що потребує залучення до вирішення цієї важливої проблеми всіх доступних організаційних та технічних мережних засобів. Важливе місце серед подібних рішень відводиться протоколам маршрутизації, які мають забезпечувати проактивний та реактивний захист елементів ТКМ. Зі зростанням у сучасному мережному трафіку частки мультимедійних потоків, що досить чутливі до затримок та втрат пакетів, на перше місце виходять задачі щодо забезпечення якості обслуговування за множиною показників NP та QoE. Результати аналізу наявних технологічних рішень та новітніх теоретичних досліджень в області відмовостійких ТКМ продемонстрували, що актуальним напрямом наукових досліджень є розвиток теорії відмовостійкої маршрутизації з розробленням відповідних математичних моделей та методів для забезпечення поряд із локальним/сегментним/глобальним захистом структурних елементів ТКМ (каналу, вузла та маршруту) також захисту рівня якості обслуговування за

множиною QoS-показників уздовж основних та резервних шляхів загалом. Для оптимізації процесів відмовостійкої маршрутизації запропоновано використовувати функціонал математичного апарату тензорного аналізу мереж, за допомогою якого необхідно сформулювати в аналітичному вигляді шукані умови захисту як множини показників мережної продуктивності, так і рівня якості обслуговування, що сприймається кінцевим користувачем.

Удосконалено тензорну модель телекомунікаційної мережі, яку представлено в базисі міжполюсних шляхів і внутрішніх вузлових пар. Новизною запропонованого рішення є отримання умов забезпечення якості обслуговування за показниками мережної продуктивності: пропускної здатності, середньої міжкінцевої затримки та ймовірності втрат пакетів, які, на відміну від відомих, є справедливими для різних режимів завантаженості мережі, а не тільки для режиму, близькому до перевантаження, та не потребують задіяння всіх доступних каналів зв'язку та маршрутів ТКМ. Застосування вдосконаленої тензорної моделі для розв'язання задач маршрутизації дозволяє підвищити рівень QoS, знизивши середню міжкінцеву затримку пакетів, та за необхідності забезпечити адаптивний характер використання каналів та шляхів ТКМ під час реалізації як одношляхової, так і багатошляхової маршрутизації.

Уперше запропоновано математичну модель швидкої перемаршрутизації трафіку даних із захистом рівня якості обслуговування за показниками пропускної здатності та ймовірності втрат пакетів у телекомунікаційній мережі. Використання моделі дозволяє реалізувати відомі схеми захисту каналу, вузла та маршруту в ТКМ із забезпеченням допустимих значень пропускної здатності та ймовірності втрат пакетів як уздовж основного, так і вздовж резервного шляху (шляхів).

Удосконалено систему тензорних моделей швидкої перемаршрутизації із захистом рівня якості обслуговування в ТКМ за множиною показників мережної продуктивності. Новизна запропонованих тензорних моделей полягає у формалізації умов забезпечення захисту рівня якості обслуговування за показниками мережної продуктивності: пропускної здатності, середньої

міжкінцевої затримки та ймовірності втрат пакетів, що особливо важливо при маршрутизації мультимедійного трафіку. Ці умови виконувались як уздовж основних, так і резервних шляхів; та є справедливими не тільки під час реалізації схем захисту каналів та вузлів, але й у процесі захисту маршруту (маршрутів).

Уперше запропоновано систему тензорних моделей маршрутизації та швидкої перемаршрутизації голосового трафіку із забезпеченням якості сприйняття послуг, що надаються кінцевим користувачам у телекомунікаційній мережі за R-фактором, у процесі реалізації схем захисту каналів, вузлів та маршруту (маршрутів). Використання тензорного підходу дозволило забезпечити заданий рівень QoE шляхом контролю за значеннями середньої міжкінцевої затримки та ймовірності втрат пакетів як уздовж основного, так і резервного шляху (шляхів) мережі.

Уперше запропоновано систему тензорних моделей маршрутизації та швидкої перемаршрутизації мультимедійного трафіку із забезпеченням якості сприйняття послуг, що надаються кінцевим користувачам у телекомунікаційній мережі за показником мультимедійної якості, під час реалізації схем захисту каналів, вузлів і маршруту (маршрутів). Використання тензорного підходу дозволило забезпечити заданий рівень QoE шляхом синхронного контролю в межах однієї мультимедійної сесії значень середньої міжкінцевої затримки та ймовірності втрат для голосового та відеопотоків пакетів як уздовж основного, так і резервного шляху (шляхів) у мережі.

Отримала подальший розвиток декомпозиційна модель міждоменної маршрутизації із забезпеченням якості обслуговування в телекомунікаційній мережі, яка складається з множини послідовно з'єднаних доменів. Новизною запропонованої моделі маршрутизації є модифікація умов збереження потоку, що дозволило сформулювати умови забезпечення міжкінцевої якості обслуговування в мультидоменних телекомунікаційних мережах за показниками пропускної здатності та середньої міжкінцевої затримки пакетів.

Подальшого розвитку набули методи ієрархічно-координаційної маршрутизації в мультидоменних телекомунікаційних мережах. Новизною

першого методу є забезпечення нормованої за доменами середньої міжкінцевої затримки пакетів, коли виконання нормованих вимог щодо якості обслуговування забезпечується в кожному домені окремо, а координація маршрутних рішень здійснюється за умовами міждоменої взаємодії. Новизна другого методу полягає в тому, що координація маршрутних рішень здійснюється як за умовами міждоменої взаємодії, так і за умовами забезпечення наскрізної середньої затримки пакетів у ТКМ загалом.

Отримав подальший розвиток метод ієрархічно-координаційної відмовостійкої маршрутизації в мультидомених телекомунікаційних мережах. Новизною методу є забезпечення захисту рівня якості обслуговування в мультидомених ТКМ за показниками пропускну здатності та середньої міжкінцевої затримки пакетів під час резервування (захисту) міждомених маршрутизаторів у процесі розрахунку основних і резервних шляхів, що дозволило підвищити масштабованість та відмовостійкість маршрутних рішень.

Застосування запропонованих рішень дозволяє покращити рівень якості обслуговування в мережі. Порівняно з математичними моделями, основаними на маршрутних метриках, виграш у значеннях середньої міжкінцевої затримки пакетів становив від 6–12 % до 18–30 %; порівняно з рішеннями Traffic Engineering – від 5–8 % до 21,5–24 %. Залежно від завантаженості мережі виграш щодо значень R-фактора становив у середньому від 12 до 25 %. Виграш щодо рівня мультимедійної якості вдалося забезпечити в середньому на 16–26 %.

Результати дослідження запропонованих тензорних моделей швидкої перемаршрутизації із захистом рівня якості обслуговування за показниками мережної продуктивності та QoE в ТКМ, представлених в різних геометричних базисах, підтвердили її адекватність. Розбіжність результатів аналітичних розрахунків, отриманих за допомогою середовища MATLAB та імітаційного моделювання з використанням пакетів NS3 та IxChariot, не перевищувала 5–8%.

**Ключові слова:** телекомунікаційна мережа, модель, метод, відмовостійкість, маршрутизація, швидка перемаршрутизація, потік, пропускна

здатність, міжкінцева затримка, ймовірність втрат, R-фактор, мультимедійна якість, якість обслуговування, якість сприйняття послуг.

## ABSTRACT

*Yevdokymenko M. O.* Theoretical foundations of fault-tolerant routing of delay- and loss-sensitive traffic in telecommunication networks using tensor models and methods. – Qualification research work as a manuscript.

Dissertation for the Doctor of Technical Sciences degree in the speciality 05.12.02 – Telecommunication systems and networks. – Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, 2020.

The dissertation is devoted to solving a relevant scientific and applied problem, which is to develop a theory of fault-tolerant routing of delay- and loss-sensitive traffic to protect the Quality of Service (QoS) level both for a set of network performance (NP) indicators and the Quality of Experience (QoE) indicators.

In the course of research on tendencies of telecommunications development it has established that: the level of requirements for ensuring the Quality of Service, reliability and fault tolerance of telecommunication networks (TCN) is constantly growing, which requires the involvement of all available organizational and technical network tools to solve this important problem. A significant place among such solutions is given to routing protocols, which should provide proactive and reactive protection of TCN elements. With the growth of the share of multimedia flows in modern network traffic, which are quite sensitive to delays and packet losses, the tasks of ensuring the QoS according to a set of NP and QoE indicators come to the fore. The results of the analysis of existing technological solutions and the latest theoretical research in the field of fault-tolerant TCN showed that the relevant area of research is the development of a theory of fault-tolerant routing with the formation of appropriate mathematical models and methods to ensure local/segment/global protection of TCN structural elements (a link, a node, a path) as well as protection of the QoS level according to a set of QoS indicators along the primary and the backup paths in general.

To optimize the processes of fault-tolerant routing, it is proposed to apply the functionality of the mathematical apparatus of network tensor analysis, using which it is necessary to analytically formulate the desired conditions for protection of both a set of network performance indicators and the QoE level.

The tensor model of the telecommunication network, which is presented in the basis of interpolator paths and internal node pairs, has been improved. The novelty of the proposed solution is to obtain conditions for quality of service according to the network performance indicators: bandwidth, average end-to-end delay and packet loss probability, which, in contrast to the known ones, are valid for different network utilization modes, not just for a mode close to overload, and do not require the utilization of all available communication links and TCN routes. The use of an advanced tensor model to solve routing problems allows to increase the level of QoS, reducing the average end-end packet delay, and, if necessary, to ensure the adaptive nature of TCN links and paths utilization when implementing both singlepath and multipath routing.

For the first time, a mathematical model of fast rerouting of data traffic with protection of the QoS in terms of bandwidth and probability of packet loss indicators in a telecommunications network has been proposed. The use of the model allows to implement the known schemes for protecting a link, a node and a path in TCN with the provision of allowable values of bandwidth and packet loss probability along both the primary and the backup path(s).

The system of tensor models of fast rerouting with protection of the TCN QoS level by a set of network performance indicators has been improved. The novelty of the proposed tensor models is in formalizing the conditions for ensuring the protection of the QoS level in terms of network performance indicators: bandwidth, average end-to-end delay and packet loss probability, which is especially important when routing multimedia traffic. These conditions were met along both the primary and the backup paths; and are valid not only during the implementation of link and node protection schemes, but also in the process of route(routes) protection.

For the first time, there has been proposed a system of tensor models for routing and fast rerouting of voice traffic with ensuring the QoE of services provided to end users in the TCN on the R-factor in the implementation of protection schemes for links, nodes and a path (paths). The use of the tensor approach allowed to provide a given level of QoE by controlling the values of the average end-to-end delay and the packet loss probability along both the primary and backup path(s) of the network.

For the first time, there has been proposed a system of tensor models of routing and fast rerouting of multimedia traffic with ensuring the QoE of services provided to end users in the telecommunications network in terms of multimedia quality during the implementation of protection schemes for links, nodes and a path (paths). The use of the tensor approach allowed to provide a given level of QoE by synchronous control within one multimedia session of values of the average end-to-end delay and loss probability for voice and video packet flows along both the primary and backup path(s) in the network.

The decomposition model of inter-domain routing with the provision of the Quality of Service in the TCN, which consists of a set of sequentially connected domains, has been further developed. The novelty of the proposed routing model is the modification of the conditions of flow conservation, which allowed to formulate the conditions for providing end-to-end QoS in multi-domain telecommunications networks in terms of bandwidth and average end-end packet delay indicators.

Methods of hierarchical coordination routing in multi-domain telecommunication networks have been further developed. The novelty of the first method is the provision of domain-normalized average end-to-end packet delay, when the normalization of QoS requirements is provided in each domain separately, and the coordination of routing decisions is carried out under the conditions of inter-domain interaction. The novelty of the second method is that the coordination of routing decisions is carried out both under the conditions of inter-domain interaction and under the conditions of providing end-to-end packet delay in TCN in general.

The method of hierarchical coordination fault-tolerant routing in multi-domain telecommunication networks has been further developed. The novelty of the method is



in protecting the QoS level in multi-domain TCN in terms of bandwidth and average end-end packet delay indicators during reservation (protection) of inter-domain routers in the process of calculating primary and backup paths, which allowed to increase the scalability and fault tolerance of routing solutions.

The application of the proposed solutions allows to improve the QoS in the network. Compared with mathematical models based on route metrics, the gain in the values of the average end-to-end packet delay ranged from 6–12% to 18–30%; compared to Traffic Engineering solutions the gain ranged from 5–8% to 21.5–24%. Depending on network congestion, the gain connected to R-factor values was at average from 12 to 25%. Gains in terms of multimedia quality were achieved by an average of 16–26%.

The results of studying the proposed tensor models of fast rerouting with protection of the QoS level in terms of network performance and QoE indicators in TCN, presented in different geometric bases, confirmed their adequacy. The discrepancy between the results of analytical calculations obtained using the MATLAB environment and simulation using NS3 and IxChariot packages did not exceed 5-8%.

**Keywords:** telecommunication network, model, method, fault tolerance, routing, fast rerouting, flow, bandwidth, end-to-end delay, probability of loss, R-factor, multimedia quality, Quality of Service, Quality of Experience.

*Список публікацій здобувача:*

1. Еременко А. С., Тарики Н., Евдокименко М. А. Оптимизационная модель отказоустойчивой маршрутизации с билинейными условиями защиты пути. *Радиоэлектроника и информатика*. 2017. №2. С. 9–14.

2. Євдокименко М. О., Кравченко Б. Д., Лукова-Чуйко Н. В. Аналіз проблеми забезпечення ефективного балансування навантаження в мережах MPLS-TE. *Проблеми телекомунікацій*. 2017. № 2 (21). С. 32–41. URL: [http://pt.nure.ua/wp-content/uploads/2020/01/172\\_yevdokymenko\\_balancing.pdf](http://pt.nure.ua/wp-content/uploads/2020/01/172_yevdokymenko_balancing.pdf).

3. Lemeshko O., Yevdokymenko M., Naors Y. Anad Alsaleem. Development of the tensor model of multipath QoE-routing in an infocommunication network with providing the required Quality Rating. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. Vol. 5, Issue 2 (95). P. 40–46. DOI: 10.15587/1729-4061.2018.141989 (**SCOPUS**).

4. Єременко О. С., Євдокименко М. О. Огляд теоретичних рішень щодо відмовостійкої маршрутизації в телекомунікаційних мережах. *Проблеми телекомунікацій*. 2018. № 1 (22). С. 25–42. URL: [http://pt.nure.ua/wp-content/uploads/2020/01/181\\_yeremenko\\_resilience.pdf](http://pt.nure.ua/wp-content/uploads/2020/01/181_yeremenko_resilience.pdf).

5. Lemeshko O., Nevzorova O., Ilyashenko A., Yevdokymenko M. Hierarchical Coordination Method of Inter-Area Routing in Backboneless Network. *Advances in Computer Science for Engineering and Education II. ICCSEEA 2019. Advances in Intelligent Systems and Computing*, Springer, Cham. 2019. Vol. 938. P. 90–102. DOI: 10.1007/978-3-030-16621-2\_9 (**SCOPUS**)

6. Lemeshko O., Yeremenko O., Yevdokymenko M. MPLS Traffic Engineering Solution of Multipath Fast ReRoute with Local and Bandwidth Protection. *Advances in Computer Science for Engineering and Education II. ICCSEEA 2019. Advances in Intelligent Systems and Computing*, Springer, Cham. 2019. Vol. 938. P. 113–125. DOI: 10.1007/978-3-030-16621-2\_11 (**SCOPUS**)

7. Невзорова О. С., Євдокименко М. О. Особливості реалізації дворівневого методу маршрутизації на контролері з багатоядерною архітектурою в програмно-конфігурованій мережі. *Проблеми телекомунікацій*. 2018. № 2 (23). С. 75–88. URL: [http://pt.nure.ua/wp-content/uploads/2020/01/182\\_nevzorova\\_multicore.pdf](http://pt.nure.ua/wp-content/uploads/2020/01/182_nevzorova_multicore.pdf).

8. Harkusha S., Lemeshko O., Yevdokymenko M., Yeremenko O. Model of structurally functional selforganization of multi-radio multi-channel mesh networks using hypergraphs. *Workshop Proceedings of the 8th International Conference on “Mathematics. Information Technologies. Education”, MoMLeT&DS-2019, Shatsk, Ukraine*. 2019. Vol. 2386. P. 75–84. URL: <http://ceur-ws.org/Vol-2386/paper6.pdf> (**SCOPUS**)

9. Євдокименко М. О., Шаповалова А. С. Метод оцінювання впливу атак на інфокомунікаційну мережу з урахуванням наявних вразливостей. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського*. 2018. Т.29 (68), № 4. С. 67–72. URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/sntuts\\_2018\\_29%2868%29\\_4%281%29\\_\\_14](http://nbuv.gov.ua/UJRN/sntuts_2018_29%2868%29_4%281%29__14)
10. Kuzminykh I., Carlsson A., Yevdokymenko M., Sokolov V. Investigation of the IoT device lifetime with secure data transmission // In: Galinina O., Andreev S., Balandin S., Koucheryavy Y. (eds) *Internet of Things, Smart Spaces, and Next Generation Networks and Systems. NEW2AN 2019, ruSMART 2019. Lecture Notes in Computer Science*, Springer, Cham. Vol. 11660. P 16–27. DOI: 10.1007/978-3-030-30859-9\_2 (SCOPUS)
11. Yevdokymenko M. O., Shapovalova A. S., Nevzorova O. S. Proactive Approach for Security of the PAAS Model of Cloud System Based on Vulnerability Assessment. *International Journal of Science and Engineering Investigations*. 2019. Vol. 8(91), P. 167–173. URL: <http://www.ijsei.com/papers/ijsei-89119-22.pdf>
12. Лемешко О. В., Шаповалова А. С., Єременко О. С., Євдокименко М. О., Хайлан А. М. Математична модель швидкої перемаршрутизації з балансуванням навантаження та диференційованого обмеження трафіка в мережах SD-WAN. *Системи управління, навігації та зв'язку*. 2019. №4 (56). С. 63–71. DOI:10.26906/SUNZ.2019.4.063.
13. Lemeshko O., Yevdokymenko M., Yeremenko O. Model of data traffic QoS fast rerouting in infocommunication networks. *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*. 2019. № 3 (9), P. 127–134. DOI: 10.30837/2522-9818.2019.9.127.
14. Євдокименко М. О. Метод ієрархічно-координаційної міждоменої маршрутизації у програмно-конфігурованій інфокомунікаційній мережі із забезпеченням нормованої якості обслуговування. *Проблеми телекомунікацій*. 2019. №. 2 (25). С. 3–26. URL: [http://pt.nure.ua/wp-content/uploads/2020/02/192\\_yevdokymenko\\_coordination-1.pdf](http://pt.nure.ua/wp-content/uploads/2020/02/192_yevdokymenko_coordination-1.pdf)

15. Lemeshko O., Yeremenko O., Sleiman B., Yevdokymenko M. Fast ReRoute Model with Realization of Path and Bandwidth Protection Scheme in SDN. *Advances in Electrical and Electronic Engineering*. 2020. Vol. 18, № 1. P. 23–30. DOI: 10.15598/aeee.v18i1.3548 (**SCOPUS**)

16. Lemeshko O., Yevdokymenko M., Hu Z., Yeremenko O. Inter-domain routing method under normalized Quality of Service based on hierarchical coordination. *Ceur Workshop Proceedings of the International Workshop on Computer Modeling and Intelligent Systems (CMIS), Zaporizhzhya, ZNTU*. 2020. Vol. 2608. P. 394–408. URL: <http://ceur-ws.org/Vol-2608/paper30.pdf> (**SCOPUS**)

17. Лемешко О. В., Євдокименко М. О. Вдосконалення потокової моделі маршрутизації в мультисервісній телекомунікаційній мережі із забезпеченням якості обслуговування. *Системи озброєння і військова техніка*. 2020. № 1(61). С. 31–43. DOI: 10.30748/soivt.2020.61.04

18. Лемешко О. В., Євдокименко М. О., Єременко О. С. Оптимізаційна модель маршрутизації чутливого до затримок трафіка в інфокомунікаційних мережах. *Збірник наукових праць «Системи управління, навігації та зв'язку»*. 2020. Т. 2 (60). С. 152–159. DOI:10.26906/SUNZ.2020.2.152

19. Лемешко О. В., Євдокименко М. О. Метод ієрархічної міждоменної маршрутизації у програмно-конфігурованій телекомунікаційній мережі із забезпеченням міжкінцевої якості обслуговування. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2020. №2(12). С. 169–182. DOI: 10.30837/2522-9818.2020.12.169

20. Lemeshko O., Yevdokymenko M. Advanced tensor approach to fast reroute with quality of service protection under multiple parameters. *Information and Telecommunication Sciences*. 2020. №1. P. 41–52. DOI: 10.20535/2411-2976.12020.41-52

21. Lemeshko O., Yevdokymenko M., Yeremenko O. Fast ReRoute Tensor Model with Quality of Service Protection Under Multiple Parameters. In: Radivilova T., Ageyev D., Kryvinska N. (eds) *Data-Centric Business and Applications. Lecture Notes*

on Data Engineering and Communications Technologies, Springer, Cham. 2020. Vol. 48. P. 489–512. DOI: 10.1007/978-3-030-43070-2\_22 (**SCOPUS**)

22. Harkusha S., Yevdokymenko M. The Development of Routing Flow Model in IEEE 802.11 Multi-radio Multi-channel Mesh Networks, Shown as a Konig Graph. In: Radivilova T., Ageyev D., Kryvinska N. (eds) Data-Centric Business and Applications. Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies, Springer, Cham. Vol. 48. P. 513–528. DOI: 10.1007/978-3-030-43070-2\_23 (**SCOPUS**)

23. Yevdokymenko M. Enhancement of the adaptive routing tensor model in the infocommunication network with providing quality of experience by the R-factor. *Technology Audit and Production Reserves*. 2020. Vol 3, № 2(53). P. 15–22. DOI: 10.15587/2312-8372.2020.20603123

24. Yevdokymenko M. Investigation of Tensor Approach for Providing Multimedia Quality in Infocommunication Networks. Ceur Workshop Proceedings of the International Workshop on Cyber Hygiene (CybHyg-2019) co-located with 1st International Conference on Cyber Hygiene and Conflict Management in Global Information Networks (CyberConf 2019). 2019. Vol. 2654, P. 227–239. URL: <http://ceur-ws.org/Vol-2654/paper18.pdf> (**SCOPUS**)

25. Lemeshko O., Yevdokymenko M., Yeremenko O., Shapovalova A. Investigation of Load-Balancing Fast ReRouting Model with Providing Fair Priority-Based Traffic Policing. In: Hu Z., Petoukhov S., Dychka I., He M. (eds) Advances in Computer Science for Engineering and Education III. ICCSEEA 2020. Advances in Intelligent Systems and Computing. Springer, Cham. 2020. Vol. 1247. P. 108–119 DOI: 10.1007/978-3-030-55506-1\_10 (**SCOPUS**)

26. Lemeshko O., Yeremenko O., Yevdokymenko M., Hailan A. M. Tensor Multiflow Routing Model to Ensure the Guaranteed Quality of Service Based on Load Balancing in Network. In: Hu Z., Petoukhov S., Dychka I., He M. (eds) Advances in Computer Science for Engineering and Education III. ICCSEEA 2020. Advances in Intelligent Systems and Computing. Springer, Cham. 2020. Vol. 1247. P. 120–131. DOI: 10.1007/978-3-030-55506-1\_11 (**SCOPUS**)

27. Lemeshko O., Yeremenko O., Hailan A.M., Yevdokymenko M., Shapovalova A. Policing Based Traffic Engineering Fast ReRoute in SD-WAN Architectures: Approach Development and Investigation. In: Al-Bakry A. et al. (eds) *New Trends in Information and Communications Technology Applications*. NTICT 2020. *Communications in Computer and Information Science*. Springer, Cham. Vol. 1183. P. 29–43. DOI: 10.1007/978-3-030-55340-1\_3 (**SCOPUS**)

28. Єременко О. С., Євдокименко М. О., Слейман Б. Удосконалена модель швидкої перемаршрутизації з реалізацією схеми захисту шляху та пропускної здатності в програмно-конфігурованих мережах. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2020. № 1 (11). С. 163–171. DOI: 10.30837/2522-9818.2020.11.163.

29. Harkusha S., Harkusha O., Ievdokymenko M. Hypergraph representations of topological model mesh-network IEEE 802.11. *Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science (TCSET): Proceedings of the 13th International Conference*. Lviv, 2016. IEEE, 2016. P. 876–878, DOI: 10.1109/TCSET.2016.7452212. (**SCOPUS**)

30. Yevdokymenko M. An adaptive algorithm for detecting and preventing attacks in telecommunication networks. *Problems of Infocommunications Science and Technology (PIC S&T): Proceedings of the Third International Scientific-Practical Conference*, Kharkiv, Ukraine, 4–6 Oct. 2016. IEEE, 2016. P. 175–177. DOI: 10.1109/INFOCOMMST.2016.7905373 (**SCOPUS**)

31. Lebedenko T., Ievdokymenko M., Ali Salem Ali. Research of Influence Flow Characteristics to Network Routers Queues Utilization. *1st International Conference Advanced Information and Communication Technologies*. Lviv, Ukraine, 2015. P. 111–112.

32. Євдокименко М. О., Маянгані Ж. М. Інтелектуальні методи захисту інформації в телекомунікаційних мережах. «*Новітні технології – для захисту повітряного простору*»: матеріали 13-ої наукової конференції Харківського національного університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба (м. Харків, 2017). Харків: ХНУПС ім. І. Кожедуба, 2017. С. 25.

33. Євдокименко М. О., Єременко О. С. Аналіз легковагових криптографічних алгоритмів для безпечної передачі даних між кінцевими пристроями з обмеженими ресурсами в системі Інтернет речей. *Проблеми електромагнітної сумісності перспективних безпроводових мереж зв'язку (EMC-2019)*: Збірник наукових праць третьої міжнародної науково-технічної конференції (м. Харків, 2017). Харків: ХНУРЕ, 2017. С. 86–88.

34. Yevdokymenko M., Elsayed Mohamed, Paul Onwuakpa. Ethical hacking and penetration testing using raspberry PI. *Problems of Infocommunications Science and Technology (PIC S&T)*: Proceedings of the Fourth International Scientific-Practical Conference, Kharkov, Ukraine, 10–13 October, 2017. IEEE, 2017. P. 179–181. DOI: 10.1109/INFOCOMMST.2017.8246375. (SCOPUS)

35. Yevdokymenko M., Manasse M., Zalushniy D., Sleiman B. Analysis of Methods for Assessing the Reliability and Security of Infocommunication Network. *Problems of Infocommunications Science and Technology (PIC S&T)*: Proceedings of the Fourth International Scientific-Practical Conference, Kharkov, Ukraine, 10–13 October, 2017. IEEE, 2017. P. 199–202. DOI: 10.1109/INFOCOMMST.2017.8246379. (SCOPUS)

36. Yeremenko O., Yevdokymenko M., Persikov A. Flow-aware approach of evaluating probability of compromise in combined structure network. *Advanced Information and Communication Technologies (AICT)*: Proceedings of the 2nd International Conference, Lviv, Ukraine, 4–7 July, 2017. IEEE, 2017. P. 258–261. DOI: 10.1109/AIACT.2017.8020114. (SCOPUS)

37. Lemeshko O., Yevsieieva O., Yevdokymenko M. Tensor Flow-Based Model of Quality of Experience Routing. *Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET)*: Proceedings of the 14th International Conference, Lviv-Slavske, Ukraine, 20–24 February, 2018. IEEE, 2018. P. 1005-1008. DOI: 10.1109/TCSET.2018.8336364. (SCOPUS)

38. Лемешко О.В., Євдокименко М.О. Тензорна модель забезпечення якості сприймання користувачами мультимедійного потоку. *XII Міжнародна науково-*

технічна конференція «Проблеми телекомунікацій» ІІТ-2018: збірник матеріалів конференції (м. Київ, 2018). Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. С. 89–91.

39. Lemeshko O., Yeremenko O., Yevdokymenko M. Tensor Model of Fault-Tolerant QoS Routing with Support of Bandwidth and Delay Protection. *Computer Sciences and Information Technologies (CSIT): Proceedings of the XIIIth International Scientific and Technical Conference*, Lviv, Ukraine, 5–8 Sept. 2018. IEEE, 2018. P. 135-138. DOI: 10.1109/STC-CSIT.2018.8526707. **(SCOPUS)**

40. Lemeshko O., Yevdokymenko M., Yeremenko O., Hailan A. Tensor QoE-based Routing Model with Evaluation of the Quality Rating. *Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics (UkrMiCo): Proceedings of the International Conference*, Odessa, Ukraine, 10-14 September, 2018. IEEE, 2018. P. 1–4. DOI: 10.1109/UkrMiCo43733.2018.9047545. **(SCOPUS)**

41. Lemeshko O., Al-Dulaimi A.M.K., Yeremenko O., Yevdokymenko M. Comparative Analysis of Solutions for Management of Time-Frequency Resource in LTE Downlink. *Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems (IDAACS): Proceeding of the 4th IEEE International Symposium on Wireless Systems within the International Conferences*, Lviv, Ukraine, 20-21 September, 2018. IEEE, 2018. P.108–111. DOI: 10.1109/IDAACS-SWS.2018.8525626. **(SCOPUS)**

42. Yevdokymenko M., Sleiman B., Harkusha S., and Harkusha O. Method of fault tolerance evaluation in conditions of destabilizing factors influence in infocommunication network. *Problems of Infocommunications Science and Technology (PIC S&T): Proceedings of the Fifth International Scientific-Practical Conference*, Kharkov, Ukraine, 9-12 October 2018. IEEE, 2018. P. 571–574. DOI: 10.1109/INFOCOMMST.2018.8632077. **(SCOPUS)**

43. Yevdokymenko M., Shapovalova A., Voloshchuk O., Carlsson A. Proactive Approach for Security of the Infocommunication Network Based on Vulnerability Assessment. *Problems of Infocommunications Science and Technology (PIC S&T): Proceedings of the Fifth International Scientific-Practical Conference*, Kharkov, Ukraine, 9-12 October 2018. IEEE, 2018. P. 609–612. DOI: 10.1109/INFOCOMMST.2018.8632079. **(SCOPUS)**



44. Лемешко О. В., Євдокименко М. О., Єременко О. С. Поточкова модель швидкої перемаршрутизації із захистом рівня обслуговування за показниками пропускної здатності та ймовірності втрат. *Фізико-технологічні проблеми передавання, оброблення та зберігання інформації в інфокомунікаційних системах*: Матеріали VII-ої міжнародної науково-практичної конференції. (м. Чернівці, 2018). Чернівці: «Місто», 2018. С. 18–20.

45. Lemeshko O., Yevdokymenko M., Yeremenko O., Hailan A.M., Segeč P., Papán J. Design of the Fast ReRoute QoS Protection Scheme for Bandwidth and Probability of Packet Loss in Software-Defined WAN. *The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronic (CADSM)*: Proceedings of the 15th International Conference, Polyana-Svalyava (Zakarpattia), Ukraine, 26 February – 2 March, 2019. P. 3/72–3/76. DOI: 10.1109/CADSM.2019.8779321. (SCOPUS)

46. Лемешко О. В., Євдокименко М. О., Єременко О. С., Мерсні А. Модель швидкої перемаршрутизації із захистом рівня QoS у телекомунікаційній мережі. *XIII Міжнародна науково-технічна конференція «Проблеми телекомунікацій» ІТТ-2019*: збірник матеріалів конференції (м. Київ, 2019). Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. С. 138–140.

47. Lemeshko O. V., Yeremenko O. S., Yevdokymenko M. O., Shapovalova A. S. Advanced solution of the Fast ReRoute based on principles of Traffic Engineering and Traffic Policing. *Science and Technology «AVIA-2019»*: Proceedings of the Fourteenth International Conference, Ukraine, 23-25 April, 2019. P. 8.21–8.23.

48. Єременко О. С., Євдокименко М. О., Шаповалова А. С. Підвищення відмовостійкості мереж засобами швидкої перемаршрутизації з балансуванням навантаження та профілюванням трафіка. *Третя міжнародна науково-технічна конференція «Комп'ютерні та інформаційні системи і технології»*: збірник наукових праць. (м. Харків, 2019). Харків: ХНУРЕ, 2019. С. 131.

49. Євдокименко М. О., Єременко О. С., Слейман Б. Тензорна модель швидкої перемаршрутизації із захистом рівня якості обслуговування. *Третя міжнародна науково-технічна конференція «Комп'ютерні та інформаційні системи і*

технології»: збірник наукових праць. (м. Харків, 2019). Харків: ХНУРЕ, 2019. С. 132.

50. Лемешко О.В., Єременко О.С., Євдокименко М.О., Слейман Б. Модель розрахунку множини маршрутів, що не перетинаються, з максимальною пропускною здатністю в MANET. *Проблеми електромагнітної сумісності перспективних безпроводових мереж зв'язку (EMC-2019)*: Збірник наукових праць четвертої міжнародної науково-технічної конференції (м. Харків, 2019). Харків: ХНУРЕ, 2019. С. 75–76.

51. Lemeshko O., Yevdokymenko M., Yeremenko O., Mersni A., Segeč P., Papán J. Quality of Service Protection Scheme under Fast ReRoute and Traffic Policing Based on Tensor Model of Multiservice Network. *Information and Digital Technologies (IDT 2019)*: Proceedings of the International Conference, 25 – 27 June 2019. Zilina, Slovakia. IEEE, 2019. P. 288–295, DOI: 10.1109/DT.2019.8813675. **(SCOPUS)**

52. Lemeshko O., Yeremenko O., Yevdokymenko M., Shapovalova A., Ilyashenko A., Sleiman B. Traffic Engineering Fast ReRoute Model with Support of Policing. *Electrical and Computer Engineering (UKRCON)*: Proceedings of the 2nd International Conference, Lviv, Ukraine, 2 – 6 July, 2019. IEEE, 2019. P. 842–845. DOI: 10.1109/UKRCON.2019.8880006. **(SCOPUS)**

53. Lemeshko O., Yevdokymenko M., Yeremenko O., Nevzorova O., Snihurov A., Kovalenko T. Fast ReRoute Model with VoIP Quality of Experience Protection. *Advanced Information and Communication Technologies (AICT)*: Proceedings of the 3rd International Conference, Lviv, Ukraine, 3 – 6 July, 2019. IEEE, 2019. P. 16-21, DOI: 10.1109/AIACT.2019.8847918. **(SCOPUS)**

54. Lemeshko O., Yeremenko O., Yevdokymenko M., Sleiman B., Hailan A.M., Mersni A. Computation Method of Disjoint Paths under Maximum Bandwidth Criterion. *Advanced Information and Communication Technologies (AICT)*: Proceedings of the 3rd International Conference, Lviv, Ukraine, 3 – 6 July, 2019. IEEE, 2019. P. 161-164, DOI: 10.1109/AIACT.2019.8847756. **(SCOPUS)**

55. Lemeshko O., Yeremenko O., Yevdokymenko M., Sleiman B. Improvement of the Calculation Model the Set of Disjoint Paths with Maximum Bandwidth. *Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics (UkrMiCo): Proceedings of the Fourth International Conference*, Odessa, Ukraine, 9 – 13 September, 2019. IEEE, 2019. P. 1–4. DOI: 10.1109/UkrMiCo47782.2019.9165311. **(SCOPUS)**

56. Lemeshko O., Yeremenko O., Yevdokymenko M., Shapovalova A., Hailan A. M., Mersni A. Cyber Resilience Approach Based on Traffic Engineering Fast ReRoute with Policing. *Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS): Proceedings of the 10th IEEE International Conference*, Metz, France, 2019. IEEE, 2019. P. 117–122. DOI: 10.1109/IDAACS.2019.8924294. **(SCOPUS)**

57. Yevdokymenko M. Routing Tensor Model with Providing Multimedia Quality. *Problems of Infocommunications Science and Technology (PIC S&T): Proceedings of the Sixth International Scientific-Practical Conference*, Kyiv, Ukraine, 2019. IEEE, 2019. P. 819–824. DOI: 10.1109/PICST47496.2019.9061280. **(SCOPUS)**

58. Lemeshko O., Yevdokymenko M., Yeremenko O. Load-Balancing Fast ReRouting Model with Providing Fair Priority-Based Traffic Policing. *Problems of Infocommunications Science and Technology (PIC S&T): Proceedings of the Sixth International Scientific-Practical Conference*, Kyiv, Ukraine, 2019. IEEE, 2019. P. 538–542. DOI: 10.1109/PICST47496.2019.9061303. **(SCOPUS)**

59. Lemeshko O., Yeremenko O., Yevdokymenko M., Sleiman B. Enhanced Solution of the Disjoint Paths Set Calculation for Secure QoS Routing. *Advanced Trends in Information Theory (ATIT): Proceedings of the International Conference*, Kyiv, Ukraine, 2019. IEEE, 2019. P. 210–213. DOI: 10.1109/ATIT49449.2019.9030520. **(SCOPUS)**

60. Kuzminykh I., Yevdokymenko M. Analysis of Security of Rootkit Detection Methods *Advanced Trends in Information Theory (ATIT): Proceedings of the*

International Conference, Kyiv, Ukraine, 2019. IEEE, 2019. P. 196–199. DOI: 10.1109/ATIT49449.2019.9030428. **(SCOPUS)**

61. Lemeshko O., Yevdokymenko M., Yeremenko O. Fast ReRoute Model with MultiMedia Quality Protection. *Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science (TCSET)*: Proceedings of the 15th International Conference, Lviv, Ukraine, 25-29 February, 2020. IEEE, 2020. P. 287–292. DOI: 10.1109/TCSET49122.2020.235441. **(SCOPUS)**

62. Lemeshko O., Yeremenko O., Yevdokymenko M., Hailan A.M. Tensor Based Load Balancing under Self-Similar Traffic Properties with Guaranteed QoS. *Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science (TCSET)*: Proceedings of the 15th International Conference, Lviv, Ukraine, 25-29 February, 2020. IEEE, 2020. P. 293–297, DOI: 10.1109/TCSET49122.2020.235442. **(SCOPUS)**

63. Lemeshko O., Yevdokymenko M., Yeremenko O. Method of Hierarchical QoS-Routing in Software-Defined Networks. *Computer and Information Systems and Technologies*: Proceedings of Fourth International Scientific and Technical Conference, Kharkiv, Ukraine. 2020. P. 81. DOI: 10.30837/IVcsitic2020201455.

64. Yeremenko O., Yevdokymenko M., Sleiman, B., Olayinka Omowumi Stephen. Fast ReRouting Flow-based Model with Implementation of Path Protection. *Computer and Information Systems and Technologies*: Proceedings of the Fourth International Scientific and Technical Conference, Kharkiv, Ukraine. 2020. P. 83. DOI: 10.30837/IVcsitic2020201458

65. Lemeshko O., Yeremenko O., Yevdokymenko M., Sleiman B., Segec P., Papan J. Advanced Performance-Based Fast Re-Routing Model with Path Protection. *Dependable Systems, Services and Technologies (DESSERT'2020)*: Proceedings of the 11th International Conference. Kyiv, Ukraine, 2020. IEEE, 2020. P. 23-28. DOI: 10.1109/DESSERT50317.2020.9125034. **(SCOPUS)**.

## ЗМІСТ

Перелік умовних скорочень .....	30
Вступ.....	35
Розділ 1. Аналіз стану проблеми забезпечення відмовостійкості телекомунікаційних мереж засобами маршрутизації.....	49
1.1. Аналіз сучасного стану та тенденцій розвитку програмно-конфігурованих телекомунікаційних систем і мереж .....	49
1.1.1. Значення програмно-конфігурованих мереж у цифровій трансформації суспільства .....	49
1.1.2. Аналіз проблеми забезпечення відмовостійкості програмно-конфігурованих мереж .....	50
1.2. Класифікація аспектів якості відповідно до стандарту еталонної моделі взаємодії відкритих систем.....	56
1.3. Аналіз підходів щодо забезпечення QoS та QoE в сучасних телекомунікаційних системах і мережах .....	63
1.3.1. Аналіз методів оцінки QoE .....	63
1.3.2. Оптимізаційний підхід щодо забезпечення QoE .....	66
1.3.3. Аналіз рішень щодо забезпечення якості обслуговування засобами маршрутизації в програмно-конфігурованих мережах .....	68
1.4. Класифікація засобів відмовостійкої маршрутизації в телекомунікаційних мережах.....	75
1.5. Аналіз механізмів відновлення після збоїв у ТКМ.....	81
1.5.1. Аналіз механізмів відновлення після збоїв у технології MPLS .....	81
1.5.2. Рішення щодо швидкої перемаршрутизації в IP мережах .....	81
1.5.3. Рішення щодо міждоменної швидкої перемаршрутизації .....	84
1.5.4. Рішення щодо відновлення після відмов у програмно-кофігурованих мережах .....	84
1.6. Особливості застосування відмовостійкої маршрутизації в SDN.....	87

1.7. Перспективи розвитку методів відмовостійкої маршрутизації щодо реалізації схем захисту рівня якості обслуговування в ТКМ .....	91
1.8. Постановка науково-технічної проблеми та її декомпозиція на окремі задачі дослідження .....	97
1.9. Висновки до першого розділу .....	102
Розділ 2. Аналіз та вдосконалення тензорних моделей мультисервісних телекомунікаційних мереж для забезпечення якості обслуговування за множиною показників.....	105
2.1. Основи геометризації структурно-функціональної побудови мультисервісної телекомунікаційної мережі.....	106
2.1.1. Принципи введення геометричного простору та систем координат на структурі телекомунікаційної мережі .....	106
2.1.2. Особливості тензорного опису телекомунікаційної мережі.....	109
2.1.3. Приклади метризації введеного на структурі телекомунікаційної мережі геометричного простору .....	117
2.2. Формалізація умов забезпечення якості обслуговування під час використання тензорної моделі мережі, представленої в базисі контурів та вузлових пар.....	121
2.3. Формалізація умов забезпечення якості обслуговування під час використання тензорної моделі мережі, представленої в базисі міжполюсних шляхів і внутрішніх вузлових пар .....	124
2.4. Удосконалення умов забезпечення якості обслуговування під час використання тензорної моделі мережі, представленої в базисі міжполюсних шляхів і внутрішніх вузлових пар .....	125
2.5. Базові потокові моделі маршрутизації в мультисервісних телекомунікаційних мережах.....	133
2.5.1. Опис базової потокової моделі маршрутизації без урахування ймовірних втрат пакетів .....	134
2.5.2. Опис базової потокової моделі маршрутизації з урахуванням ймовірних втрат пакетів .....	136

2.5.3. Система введених критеріїв оптимальності розв’язання задач маршрутизації із забезпеченням якості обслуговування .....	141
2.6. Дослідження процесів маршрутизації за допомогою запропонованої тензорної моделі телекомунікаційної мереж.....	147
2.6.1. Аналіз впливу виду критерію оптимальності на характер рішень QoS-маршрутизації з використанням запропонованої тензорної моделі телекомунікаційної мережі.....	147
2.6.2. Порівняльний аналіз рішень задач маршрутизації з підтримкою якості обслуговування .....	155
2.7. Висновки до другого розділу .....	166
Розділ 3. Математичні моделі швидкої перемаршрутизації із захистом рівня якості обслуговування за множиною показників мережної продуктивності .	169
3.1. Розробка потокової моделі швидкої перемаршрутизації трафіка даних із захистом рівня якості обслуговування за показниками пропускної здатності та ймовірності втрат пакетів .....	170
3.1.1. Базова потокова модель швидкої перемаршрутизації в телекомунікаційній мережі .....	170
3.1.2. Формалізація умов забезпечення захисту каналу зв’язку, вузла, маршруту, пропускної здатності та ймовірності втрат пакетів за умов швидкої перемаршрутизації в телекомунікаційній мережі .....	174
3.1.3. Формалізація критерія оптимальності рішень задачі швидкої перемаршрутизації трафіка даних в телекомунікаційній мережі .....	176
3.2 Дослідження потокової моделі швидкої перемаршрутизації трафіка даних із захистом рівня якості обслуговування за показниками пропускної здатності та ймовірності втрат пакетів .....	177
3.3. Розроблення системи тензорних моделей швидкої перемаршрутизації із захистом рівня якості обслуговування за множиною показників мережної продуктивності .....	182
3.3.1. Тензорна модель швидкої перемаршрутизації в телекомунікаційній мережі, яка представлена в базисі контурів та вузлових пар .....	183

3.3.2. Тензорна модель швидкої перемаршрутизації в телекомунікаційній мережі, яка представлена в базисі міжполюсних шляхів і внутрішніх вузлових пар.....	187
3.4. Дослідження системи тензорних моделей швидкої перемаршрутизації із захистом рівня якості обслуговування за множиною показників мережної продуктивності .....	189
3.4.1. Дослідження тензорної моделі швидкої перемаршрутизації в телекомунікаційній мережі, яка представлена в базисі контурів та вузлових пар .....	189
3.4.2. Дослідження тензорної моделі швидкої перемаршрутизації в телекомунікаційній мережі, яка представлена в базисі міжполюсних шляхів і внутрішніх вузлових пар .....	197
3.5. Висновки до третього розділу.....	202
Розділ 4. Тензорні моделі та методи швидкої перемаршрутизації із захистом рівня якості обслуговування, що сприймається кінцевим користувачем .....	205
4.1. Тензорні моделі QoE-маршрутизації із забезпеченням якості обслуговування за показником R-фактора .....	206
4.2. Дослідження запропонованих моделей QoE-маршрутизації із забезпеченням якості обслуговування за показником R-фактора .....	215
4.2.1. Дослідження тензорної моделі QoE-маршрутизації із забезпеченням якості обслуговування за показником R-фактора, представленої в базисі контурів та вузлових пар .....	215
4.2.2. Дослідження тензорної моделі QoE-маршрутизації із забезпеченням якості обслуговування за показником R-фактора, представленої в базисі міжполюсних шляхів та внутрішніх вузлових пар .....	218
4.2.2.1. Дослідження впливу зміни вимог щодо значень R-фактора на розв'язання задачі QoE-маршрутизації.....	219
4.2.2.2. Аналіз впливу завантаженості мережі на рішення розв'язання задачі QoE-маршрутизації .....	222



4.2.2.3. Аналіз процесів QoE-маршрутизації в умовах диференційованого забезпечення якості обслуговування за показником R-фактора .....	224
4.2.2.4. Порівняльний аналіз запропонованого та відомих технологічних рішень задачі QoE-маршрутизації VoIP-потоків .....	227
4.3. Тензорні моделі швидкої перемаршрутизації із забезпеченням якості обслуговування за показником R-фактора .....	229
4.3.1. Опис тензорних моделей швидкої перемаршрутизації із забезпеченням якості обслуговування за показником рейтингу якості .....	229
4.4. Дослідження запропонованих моделей QoE-перемаршрутизації із забезпеченням якості обслуговування за показником R-фактора .....	235
4.4.1. Дослідження тензорної моделі швидкої перемаршрутизації із забезпеченням якості обслуговування за показником R-фактора, представленої в базисі контурів та вузлових пар .....	235
4.4.2. Дослідження тензорної моделі швидкої перемаршрутизації із забезпеченням якості обслуговування за показником R-фактора, представленої в базисі міжполюсних шляхів та внутрішніх вузлових пар ....	239
4.5. Тензорні моделі QoE-маршрутизації із забезпеченням мультимедійної якості.....	241
4.5.1. Опис потокової моделі маршрутизації мультимедійного трафіка в телекомунікаційній мережі .....	242
4.5.2. Методика розрахунку показника мультимедійної якості .....	245
4.5.3. Умови захисту показника мультимедійної якості під час реалізації стратегії QoE-маршрутизації.....	250
4.5.4. Формалізація критеріїв оптимальності рішень задачі QoE-маршрутизації для забезпечення мультимедійної якості.....	253
4.6. Дослідження запропонованих моделей QoE-маршрутизації із забезпеченням мультимедійної якості .....	254
4.6.1. Дослідження тензорної моделі QoE-маршрутизації із забезпеченням мультимедійної якості, представленої в базисі контурів та вузлових пар.....	254

4.6.2. Дослідження тензорної моделі QoE-маршрутизації із забезпеченням мультимедійної якості, представленої в базисі міжполюсних шляхів та внутрішніх вузлових пар .....	258
4.7. Тензорні моделі швидкої QoE-перемаршрутизації із захистом рівня мультимедійної якості .....	265
4.7.1. Опис потокової моделі швидкої перемаршрутизації мультимедійного трафіка в телекомунікаційній мережі .....	265
4.7.2. Умови захисту рівня мультимедійної якості в ТКМ .....	268
4.7.3. Формалізація критеріїв оптимальності рішень задачі швидкої QoE-перемаршрутизації із захистом рівня мультимедійної якості .....	272
4.8. Дослідження запропонованих моделей швидкої QoE-перемаршрутизації із захистом рівня мультимедійної якості .....	273
4.8.1. Дослідження тензорної моделі швидкої QoE-перемаршрутизації із захистом рівня мультимедійної якості, представленої в базисі контурів та вузлових пар.....	273
4.8.2. Дослідження тензорної моделі швидкої QoE-перемаршрутизації із захистом рівня мультимедійної якості, представленої в базисі міжполюсних шляхів та внутрішніх вузлових пар .....	277
4.9. Висновки до четвертого розділу .....	281
Розділ 5. Моделі та методи ієрархічно-координаційної міждоменної маршрутизації у програмно-конфігурованій телекомунікаційній мережі із забезпеченням якості обслуговування .....	287
5.1. Огляд відомих рішень задач ієрархічної маршрутизації в мультидоменних телекомунікаційних мережах.....	287
5.2. Декомпозиційна модель міждоменної QoS-маршрутизації в програмно-конфігурованій телекомунікаційній мережі, що складається з множини послідовно з'єднаних доменів .....	290
5.3. Умови забезпечення міжкінцевої якості обслуговування в мультидоменній телекомунікаційній мережі .....	296
5.4. Метод ієрархічно-координаційної міждоменної маршрутизації в	

програмно-конфігурованій телекомунікаційній мережі із забезпеченням нормованої якості обслуговування.....	299
5.5. Дослідження запропонованого методу ієрархічно-координаційної міждоменної маршрутизації в програмно-конфігурованій телекомунікаційній мережі із забезпеченням нормованої якості обслуговування.....	306
5.6. Метод ієрархічно-координаційної міждоменної маршрутизації в програмно-конфігурованій телекомунікаційній мережі із забезпеченням міжкінцевої якості обслуговування.....	314
5.7. Дослідження запропонованого методу ієрархічно-координаційної міждоменної маршрутизації в програмно-конфігурованій телекомунікаційній мережі із забезпеченням міжкінцевої якості обслуговування.....	319
5.7.1. Дослідження запропонованого методу ієрархічно-координаційної міждоменної QoS-маршрутизації під час координації рішень за середньою міжкінцевою затримкою.....	319
5.7.2. Дослідження запропонованого методу ієрархічно-координаційної міждоменної QoS-маршрутизації під час координації рішень за середньою міжкінцевою затримкою та зв'язністю міждоменних маршрутів.....	324
5.8. Метод ієрархічно-координаційної відмовостійкої маршрутизації в мультидоменних телекомунікаційних мережах із захистом рівня міжкінцевої якості обслуговування.....	326
5.8.1. Декомпозиційна модель ієрархічно-координаційної відмовостійкої маршрутизації в мультидоменних телекомунікаційних мережах.....	327
5.8.2. Розробка методу ієрархічно-координаційної відмовостійкої маршрутизації в мультидоменних телекомунікаційних мережах із захистом рівня міжкінцевої якості обслуговування.....	330
5.8.3. Дослідження методу ієрархічно-координаційної відмовостійкої маршрутизації в мультидоменних телекомунікаційних мережах із захистом рівня міжкінцевої якості обслуговування.....	333
5.9. Висновки до п'ятого розділу.....	335
Розділ 6. Експериментальне дослідження запропонованих маршрутних	

рішень та розроблення науково-методичних рекомендацій щодо їх практичної реалізації.....	339
6.1. Особливості експериментального дослідження тензорних моделей маршрутизації та швидкої перемаршрутизації із забезпеченням якості обслуговування в телекомунікаційних мережах за допомогою Network Simulator 3 .....	339
6.1.1. Обґрунтування вибору засобів експериментального дослідження процесів маршрутизації в телекомунікаційних мережах.....	339
6.1.2. Опис базової імітаційної моделі з використанням NS3 .....	342
6.1.3. Дослідження тензорної моделі швидкої перемаршрутизації із захистом рівня якості обслуговування за показниками мережної продуктивності в ТКМ, представленої в базисі контурів та вузлових пар, за допомогою Network Simulator 3 .....	347
6.1.4. Дослідження тензорної моделі швидкої перемаршрутизації із захистом рівня якості обслуговування за показниками мережної продуктивності в ТКМ, яка представлена в базисі міжполюсних шляхів і внутрішніх вузлових пар, з використанням пакету Network Simulator 3 .....	360
6.2. Дослідження системи тензорних моделей швидкої перемаршрутизації із захистом рівня якості обслуговування, що сприймається кінцевим користувачем, за допомогою IxChariot .....	369
6.2.1. Опис базової імітаційної моделі з використанням IxChariot.....	369
6.2.2. Дослідження тензорної моделі швидкої перемаршрутизації із захистом рівня якості обслуговування за показником R-фактора за допомогою пакета IxChariot .....	372
6.2.3. Дослідження тензорної моделі швидкої перемаршрутизації із захистом рівня мультимедійної якості за допомогою пакета IxChariot .....	378
6.3. Рекомендації щодо практичного використання запропонованих моделей і методів відмовостійкої маршрутизації в телекомунікаційних мережах .....	383
6.4. Висновки до шостого розділу .....	389
Висновки по роботі .....	392

Список використаних джерел .....	396
Додаток А. Акти впровадження.....	443
Додаток Б. Проміжні результати дослідження запропонованих моделей та методів маршрутизації.....	450
Б.1. Проміжні результати дослідження процесів маршрутизації за допомогою запропонованої в другому розділі тензорної моделі телекомунікаційної мережі.....	450
Б.2. Проміжні результати дослідження процесів QoE-маршрутизації VoIP-потоків за допомогою запропонованих у четвертому розділі тензорних моделей.....	454
Б.3. Проміжні результати дослідження процесів швидкої QoE-перемаршрутизації VoIP-потоків за допомогою запропонованих у четвертому розділі тензорних моделей.....	456
Б.4. Проміжні результати дослідження процесів швидкої QoE-перемаршрутизації із захистом рівня мультимедійної якості за допомогою запропонованих у четвертому розділі тензорних моделей.....	457
Б.5. Проміжні результати дослідження методу ієрархічно-координаційної міждоменної QoS-маршрутизації під час координації рішень за середньою міжкінцевою затримкою.....	460
Додаток В. Список публікацій здобувача за темою дисертації .....	465

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

ІКТ	інформаційно-комунікаційні технології
КЗ	канал зв'язку
ПЗ	пропускна здатність
СК	система координат
СМЗП	середня міжкінцева затримка пакетів
СМО	система масового обслуговування
ТКМ	телекомунікаційна мережа
AI (Artificial Intelligence)	штучний інтелект
AMR (Adaptive multi rate)	адаптивне кодування зі змінною швидкістю
API (Application Programming Interface)	прикладний програмний інтерфейс
AS (Autonomous System)	автономна система
ATM (Asynchronous Transfer Mode)	асинхронний режим передачі
BGP (Border Gateway Protocol)	протокол приграничного шлюзу
BR (Border Router)	приграничний маршрутизатор
CBWFQ (Class-Based Weighted Fair Queueing)	зважена справедлива черга на основі класів
DASH (Dynamic Adaptive Streaming over HTTP)	динамічна адаптивна потокова передача через HTTP
DSCP (Differentiated Services Code Point)	точка коду диференційованих послуг
DSCQS (Double Stimulus Continuous Quality Scale)	безперервна шкала якості з подвійним стимулом
DiffServ (Differentiated Services)	диференційоване обслуговування
DSIS (Double Stimulus Impairment Scale)	подвійна шкала знецінення стимулу

EF PHB (Expedited Forwarding Per-Hop Behavior)	пришвидшена переадресаційна поведінка
EGP (Exterior Gateway Protocol)	протокол зовнішнього шлюзу
EIGRP (Enhanced Interior Gateway Routing Protocol)	вдосконалений протокол внутрішньої маршрутизації між шлюзами
FN (Future Networks)	мережі майбутнього
FRR (Fast ReRoute)	швидка перемаршрутизація
GLBP (Gateway Load Balancing Protocol)	протокол балансування навантаження шлюзу за замовчуванням
GMPLS (Generalized Multi-Protocol Label Switching)	узагальнена багатопроTOCOLьна комутація за мітками
H-SDN (Hybrid SDN)	гібридні програмно-конфігуровані мережі
HSRP (Hot Standby Router Protocol)	протокол маршрутизатора гарячого резерву
ICMP (Internet Control Message Protocol)	міжмережний протокол керуючих повідомлень
IGP (Interior Gateway Protocol)	протокол внутрішнього шлюзу
IGRP (Interior Gateway Routing Protocol)	протокол внутрішньої маршрутизації між шлюзами
IntServ (Integrated Services)	інтегроване обслуговування
IoT (Internet of Things)	інтернет речей
IP (Internet Protocol)	протокол міжмережної взаємодії
IPDV (IP packet delay variation)	варіація затримки передачі IP-пакета
IPER (IP packet error ratio)	коефіцієнт (доля) помилок IP-пакетів
IPLR (IP packet loss ratio)	коефіцієнт (доля) втрат IP-пакетів
IPsec (Internet Protocol Security)	протокол для забезпечення захисту даних
IPTD (IP packet transfer delay)	міжкінцева затримка передачі IP-пакета
IS-IS (Intermediate System – to – Intermediate System)	протокол маршрутизації «проміжна система – проміжна система»

ITU (International Telecommunication Union)	міжнародний союз телекомунікацій
LB (Load Balancing)	балансування навантаження
LDP (Label Distribution Protocol)	протокол розподілу міток
LER (Label Edge Routers)	граничний маршрутизатор міток
LSR (Label Switching Router)	комутація пакетів за мітками
LLQ (Low-Latency Queuing)	механізм черг з низькою затримкою
MDRR (Modified Deficit Round Robin)	модифікований алгоритм кругового обслуговування з дефіцитом
MILP (Mixed Integer Linear Programming)	змішане цілочисельне лінійне програмування
MINLP (Mixed Integer NonLinear Programming).	змішане цілочисельне нелінійне програмування
ML (Machine Learning)	Машинне навчання
MMQ (Multimedia Quality)	мультимедійна якість
MOS (Mean Opinion Score)	суб'єктивна оцінка якості
MPLS (Multiprotocol Label Switching)	багатопротокольна комутація за мітками
MWRR (Modified Weighted Round Robin)	модифікований зважений алгоритм кругового обслуговування
MRT (Maximally Redundant Trees)	механізм на основі побудови максимально надлишкових дерев
MTBF (Mean Time Between Failures)	середній час між відмовами
MTBI (Mean time between interruptions)	середній час між перериваннями
MTTF (Mean time to failure)	середній час до відмови
MTTR (Mean Time To Recovery)	середній час відновлення
MUT/MDT (Mean up time / mean down time)	середній час роботи / середній час простою



NBI (North Bound Interface)	північний інтерфейс SDN
NFV (Network Function Virtualization)	віртуалізація мережних функцій
NGN (Next Generation Network)	мережа наступного покоління
NLP (Nonlinear Programming)	нелінійне програмування
NP	мережна продуктивність
NS3 (Network Simulator v.3)	мережний симулятор версії 3
OSI (Open Systems Interconnection)	еталонна модель взаємодії відкритих систем
OSPF (Open Shortest Path First)	протокол маршрутизації по найкоротшому шляху
PIA / PIU (Percent IP service unavailability /availability)	(не) доступність /доступність IP-послуги
PQ (Priority Queuing)	черги за пріоритетами
PNNI (Private Network – to – Network Interface)	протокол маршрутизації «приватний міжмережний інтерфейс»
PSFFA (Pointwise Stationary Fluid Flow Approximation)	стаціонарна точкова апроксимація нестаціонарного потоку
PSQA (Pseudo-Subjective Quality Assessment)	псевдо-суб'єктивна оцінка якості
QoD (Quality of Delivery)	якість доставки
QoE (Quality of Experience)	якість сприйняття
QoP (Quality of Protection)	якість захисту
QoR (Quality of Resilience)	якість відмовостійкості
QoS (Quality of Service)	якість обслуговування
QR (Quality Rating)	рейтинг якості
RED (Random Early Detection)	механізм випадкового раннього виявлення перевантаження
RN (Resilient Networks)	відмовостійкі мережі
RIP (Routing Information Protocol)	протокол маршрутної інформації

RSVP (Resource Reservation Protocol)	протокол резервування ресурсів
RTP (Real-time Transport Protocol)	протокол передачі трафіка реального часу
SBI (South Bound Interface)	південний інтерфейс SDN
SD-WAN (Software-Defined Networking in a Wide Area Network)	програмно-конфігуровані територіально-розподілені мережі
SDN (Software Defined Networking)	програмно-конфігуровані мережі
SLA (Service Level Agreement)	угода про рівень надання послуги
SLB (Severe Loss Block)	блок значних втрат
SON (Self-Organized Networks)	самоорганізовані мережі
SPF (Shortest Path First)	алгоритм пошуку найкоротших шляхів
SPT (Shortest Path Tree)	дерево найкоротших шляхів
SSCQE (Single-Stimulus Continuous Quality Evaluation)	постійне оцінювання якості з одним стимулом
TD (Timely Delivery)	своєчасна доставка
TE (Traffic Engineering)	інжиніринг трафіка
ToS (Type of Service)	тип обслуговування
VoIP (Voice over IP)	передача голосу через IP
VRRP (Virtual Router Redundancy Protocol)	протокол резервування віртуального маршрутизатора
WFQ (Weighted Fair Queuing)	зважена справедлива черга
WRED (Weighted Random Early Detection)	механізм зваженого випадкового раннього виявлення перевантаження

## ВСТУП

Характерною особливістю сучасного інформаційного суспільства є постійне зростання обсягу та різноманітності даних, які циркулюють в його основних електронних підсистемах, таких як е-уряд, е-комерція, е-освіта, інтернет-банкінг, телемедицина тощо. У зв'язку із впровадженням нових сервісів та інформаційних технологій, наприклад, інтернету речей (Internet of things, IoT), міжмашинної взаємодії (Machine-to-Machine (M2M), Massive Machine-Type Communications (mMTC)), зокрема з високою надійністю та малими затримками (Ultra-Reliable Low Latency communication (URLLC)), інтерактивного телебачення високої якості, розумного міста/будинку/квартири, висувуються все більш жорсткі вимоги до архітектури та множини функцій телекомунікаційних систем і мереж, які становлять системоутворювальну основу єдиного інформаційного простору будь-якої країни [1, 2].

Як правило, вимоги споживачів інформації до телекомунікаційних мереж (ТКМ) стосуються підтримки мобільності, безпеки та надійності сервісів, а також забезпечення заданого рівня якості обслуговування (Quality of Service, QoS) загалом [3, 4]. До того ж, залежно від контенту, який передається в межах єдиної ТКМ, перелік та рівень QoS-вимог можуть досить суттєво відрізнятись. Також усе більше інфокомунікаційних послуг є чутливими до затримок та/або втрат пакетів. У телекомунікаційній термінології широко використовуються такі поняття, як «мережі», «сервіси» або «трафік», що чутливі до затримок або втрат, наприклад, Delay-Sensitive Networks (DSN) або Loss-Sensitive Traffic (LST) [5–7]. Щоб задовольнити інтенсивне зростання вимог, які висувуються до ТКМ нових поколінь, світова телекомунікаційна галузь в останні роки відреагувала створенням, оперативним упровадженням та невпинним розвитком технологій програмно-конфігурованих мереж (Software-Defined Networking, SDN), віртуалізацією мережних функцій (Network Function Virtualization, NFV), які будуються на принципах самоорганізації й на використанні хмарних середовищ [8–10].

**Актуальність теми.** Як показав проведений аналіз, однією з новітніх тенденцій у постійному вдосконаленні ТКМ є побудова так званих надійних мереж (Resilience Networks, RN), здатних забезпечити виконання покладених на них завдань із заданим рівнем QoS в умовах виходу з ладу або перевантаження комутаційного або серверного обладнання, порушення рівня інформаційної безпеки елементів ТКМ, деградації її топології тощо [11–14]. Для цього на практиці функціональність RN на апаратному та протокольному рівнях значно розширюється в напрямку забезпечення відмовостійкості мережних рішень та сервісів, що реалізується в межах перспективних багаторівневих архітектур підтримки якості захисту (Quality of Protection, QoP) та якості надійності (Quality of Resilience, QoR) [15, 16].

Вирішення технологічної проблеми щодо забезпечення відмовостійкості ТКМ потребує комплексних заходів, які охоплюють функціонал усіх рівнів еталонної моделі взаємодії відкритих систем (Open Systems Interconnection model, OSI). Важливе місце серед них посідають технологічні рішення мережного рівня OSI, а саме протоколи маршрутизації, які в останні роки нарощують свої можливості щодо забезпечення відмовостійкості як традиційних мереж IP та MPLS, так і SDN. Протоколи відмовостійкої маршрутизації (Fault-Tolerant Routing, FTR) та швидкої перемаршрутизації (Fast ReRouting, FRR) органічно інтегруються з новітніми ефективними маршрутними рішеннями – сегментною, ієрархічною маршрутизацією, маршрутизацією з підтримкою якості обслуговування та інжинірингом трафіку (Traffic Engineering, TE) [17–24].

Вагомий внесок у розроблення й теоретичне обґрунтування рішень мережного рівня OSI, маршрутизації та забезпечення відмовостійкості ТКМ здійснили такі іноземні фахівці, як J. J. Garcia-Luna-Aceves, Y. Seok, D. Tipper, T. Gomes, L. Martins, J. Rak, J. Tapolcai, а також українські вчені: В. В. Поповський, Л. Н. Беркман, П. П. Воробієнко, І. В. Стрелковська, В. А. Романюк, М. М. Климаш, Б. Ю. Волочій, О. В. Лемешко, О. Ю. Євсєєва, Ю. О. Кулаков, О. С. Єременко, С. В. Гаркуша та багато інших. Проте, навіть

зважаючи на досить глибоке опрацювання основних положень відмовостійкої маршрутизації в ТКМ [25–63], наука й практика телекомунікацій потребує теоретичних рішень, які б задовольняли низку вимог:

- врахування багатопотокового та переважно мультимедійного характеру сучасного мережного трафіку, залежно від типу якого в ТКМ необхідно забезпечити гарантії якості обслуговування як за множиною показників мережної продуктивності (Network Performance, NP), так і за показниками якості сприйняття користувачем (Quality of Experience, QoE);

- забезпечення комплексного характеру рішень щодо одночасної реалізації схем як локального, сегментного та глобального захисту, так і захисту рівня якості обслуговування за показниками NP/QoE;

- реалізація схем захисту рівня якості обслуговування за множиною показників мережної продуктивності – продуктивністю (швидкістю передачі), середньою міжкінцевою затримкою та ймовірністю втрат пакетів в залежності від типу мережного трафіка в ТКМ;

- реалізація схем захисту рівня якості обслуговування на рівні користувача за показником R-фактора в процесі передачі голосового трафіку (VoIP) та показником мультимедійної якості (Multimedia Quality, MMq) за умов маршрутизації мультимедійного трафіку в ТКМ;

- забезпечення оптимальності та масштабованості маршрутних рішень із підтримкою якості обслуговування на основі реалізації ієрархічних та ієрархічно-координаційних стратегій маршрутизації в ТКМ.

Повноцінне та всеохопне задоволення переліченої множини технологічних вимог можливо забезпечити лише шляхом удосконалення наявних та розроблення нових математичних моделей і методів відмовостійкої маршрутизації, які так само становили б основу математичного, алгоритмічного та програмного забезпечення перспективних маршрутизаторів, серверів та контролерів маршрутів у ТКМ.

Отже, актуальності набуває **науково-прикладна проблема**, що полягає в розвитку теорії відмовостійкої маршрутизації чутливого до затримок і втрат

трафіку в напрямку забезпечення захисту рівня якості обслуговування як за множиною показників мережної продуктивності, так і за показниками якості сприйняття користувачем.

Для вирішення поставленої наукової проблеми необхідно, по-перше, чітко визначити перелік параметрів мережі й характеристик трафіку, які впливають на рівень якості обслуговування в ТКМ, а по-друге, забезпечити оцінку ступеня впливу цих параметрів на значення QoS-показників. Це можливо реалізувати лише з використанням адекватних аналітичних моделей ТКМ, які враховують особливості структурно-функціональної побудови сучасних мереж, стратегії відмовостійкої маршрутизації та схем захисту (резервування). Як показали результати проведеного аналізу [1–32], для розв’язання широкої множини задач щодо управління трафіком, маршрутизації та забезпечення якості обслуговування в ТКМ добре себе зарекомендував математичний апарат тензорного аналізу мереж [46, 50, 53–57]. Його основи запропонував Г. Крон [64, 65] для розрахунку електротехнічних мереж, які за останні роки були доповнені науково-прикладними рішеннями щодо аналізу та дослідження різноманітних технічних, економічних та соціальних систем, що мають складну мережну архітектуру.

Відносно новим напрямом застосування тензорного аналізу мереж є оптимізація процесів відмовостійкої маршрутизації в умовах, коли поряд із локальним/сегментним/глобальним захистом структурних елементів ТКМ (каналу, вузла та маршруту) необхідно забезпечити захист рівня якості обслуговування за множиною QoS-показників уздовж основних та резервних шляхів загалом. Відомі підходи в цьому напрямі обмежувалися рішеннями щодо захисту таких двох важливих показників мережної продуктивності, як пропускна здатність та середня міжкінцева затримка пакетів [55–57]. Тому тема цієї дисертаційної роботи, присвяченої розробленню теоретичних основ відмовостійкої маршрутизації чутливого до затримок та втрат трафіку в ТКМ із використанням тензорних моделей і методів, є актуальною.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.**

Дисертація пов'язана з виконанням положень «Концепції національної інформаційної політики», «Концепції Національної програми інформатизації», «Концепції розвитку цифрової економіки та суспільства України на 2018–2020 роки» та «Концепції конвергенції телефонних мереж і мереж з пакетною комутацією в Україні». Результати дисертаційної роботи використані в науково-дослідних роботах: № 299-1 «Підвищення масштабованості технологічних рішень щодо забезпечення якості обслуговування в конвергентних телекомунікаційних системах» (ДР № 0115U002432), № 261-1 «Методи підвищення продуктивності безпроводових мереж наступного покоління» (ДР № 0111U002627), у яких здобувач був виконавцем.

**Мета дисертаційної роботи** полягає в підвищенні рівня якості обслуговування при забезпеченні відмовостійкості телекомунікаційних мереж шляхом розроблення нових та вдосконалення наявних математичних моделей і методів відмовостійкої маршрутизації.

Для вирішення поставленої науково-прикладної проблеми в дисертаційній роботі виконувалися такі **завдання дослідження**:

- аналіз сучасного стану та перспектив подальшого розвитку технологічних засобів забезпечення відмовостійкості телекомунікаційних мереж та якості обслуговування користувачів;
- огляд теоретичних рішень у напрямі відмовостійкої маршрутизації в телекомунікаційних мережах;
- розроблення та дослідження тензорних моделей телекомунікаційних мереж з удосконаленням умов забезпечення якості обслуговування за множиною показників мережної продуктивності та показників, що сприймаються на рівні користувачів;
- розроблення та дослідження моделей і методів швидкої перемаршрутизації в телекомунікаційних мережах із захистом рівня якості обслуговування за показниками мережної продуктивності;
- розроблення та дослідження моделей і методів швидкої

перемаршрутизації в телекомунікаційних мережах із захистом рівня якості обслуговування, що сприймається кінцевими користувачами;

– розроблення та дослідження моделей і методів ієрархічно-координаційної маршрутизації та швидкої перемаршрутизації в мультидоменних телекомунікаційних мережах із забезпеченням (захистом) якості обслуговування за множиною показників;

– оцінка ефективності та розроблення системи науково-методичних рекомендацій щодо практичного використання запропонованих у дисертації моделей та методів відмовостійкої маршрутизації із захистом рівня якості обслуговування в ТКМ.

**Об’єкт дослідження** – процеси відмовостійкої маршрутизації із захистом рівня якості обслуговування в телекомунікаційних мережах процеси відмовостійкої маршрутизації із захистом рівня якості обслуговування в телекомунікаційних мережах.

**Предмет дослідження** – математичні моделі та методи відмовостійкої маршрутизації із захистом рівня якості обслуговування в телекомунікаційних мережах.

**Методи дослідження.** Під час опису топології та мультидоменної структури ТКМ використовувалися теорія множин і теорія графів. У процесі розроблення та вдосконалення математичних моделей QoS-маршрутизації та швидкої перемаршрутизації із забезпеченням захисту рівня якості обслуговування в ТКМ були використані основні положення тензорного обчислення та тензорного аналізу мереж, запропонованого Г. Кроном. У розробленні моделей та методів ієрархічно-координаційної QoS-маршрутизації та швидкої перемаршрутизації застосовувалися постулати та принципи теорії ієрархічних багаторівневих систем. Для розв’язання оптимізаційних задач відмовостійкої QoS-маршрутизації використовувалися методи лінійного, нелінійного та змішаного цілочисельного програмування, які програмно представлені в середовищі MATLAB. Для оцінки адекватності та ефективності



отриманих у роботі теоретичних рішень використано пакети імітаційного моделювання NS3 та IxChariot.

**Наукова новизна отриманих результатів.** Головним новим науковим результатом дисертаційної роботи є розвиток теорії відмовостійкої маршрутизації в телекомунікаційних мережах в напрямку забезпечення захисту рівня якості обслуговування як за множиною показників мережної продуктивності, так і за показниками якості сприйняття користувачем, який заснований на використанні тензорних моделей і методів. Запропоновані теоретичні основи містять емпіричні дані, понятійний апарат теорії, її базові тензорні математичні моделі та оптимізаційні методи розв'язання маршрутних задач. У межах головного наукового результату отримані такі наукові результати:

1. Удосконалено тензорну модель телекомунікаційної мережі, яку представлено в базисі міжполюсних шляхів і внутрішніх вузлових пар. Новизною запропонованого рішення є отримання умов забезпечення якості обслуговування за показниками мережної продуктивності: пропускної здатності, середньої міжкінцевої затримки та ймовірності втрат пакетів, які, на відміну від відомих, є справедливими для різних режимів завантаженості мережі, а не тільки для режиму, близькому до перевантаження, та не вимагають задіяння всіх доступних каналів зв'язку та маршрутів ТКМ. Застосування вдосконаленої тензорної моделі ТКМ для розв'язання задач маршрутизації дозволяє підвищити рівень якості обслуговування, знизивши середню міжкінцеву затримку пакетів, та за необхідності забезпечити адаптивний характер використання каналів та шляхів ТКМ під час реалізації як одношляхової, так і багатошляхової маршрутизації.

2. Уперше запропоновано математичну модель швидкої перемаршрутизації трафіку даних із захистом рівня якості обслуговування за показниками пропускної здатності та ймовірності втрат пакетів у телекомунікаційній мережі. Використання моделі дозволяє реалізувати відомі схеми захисту каналу, вузла та маршруту в ТКМ із забезпеченням допустимих

значень пропускної здатності та ймовірності втрат пакетів як уздовж основного, так і вздовж резервного шляху (шляхів).

3. Удосконалено систему тензорних моделей швидкої перемаршрутизації із захистом рівня якості обслуговування в ТКМ за множиною показників мережної продуктивності. Новизна запропонованих тензорних моделей полягає в тому, що

- формалізовано умови забезпечення захисту рівня якості обслуговування за показниками пропускної здатності, середньої міжкінцевої затримки та ймовірності втрат пакетів, що особливо важливо під час маршрутизації мультимедійного трафіку;

- умови забезпечення захисту рівня якості обслуговування за множиною показників мережної продуктивності виконувались як уздовж основних, так і резервних шляхів; є справедливими не тільки під час реалізації схем захисту каналів та вузлів, але й для захисту маршруту (маршрутів) мережі.

4. Уперше запропоновано систему тензорних моделей маршрутизації та швидкої перемаршрутизації голосового трафіку із забезпеченням якості сприйняття послуг, що надаються кінцевим користувачам у телекомунікаційній мережі за R-фактором, у процесі реалізації схем захисту каналів, вузлів та маршруту (маршрутів). Використання тензорного підходу дозволило забезпечити заданий рівень QoE шляхом контролю за значеннями середньої міжкінцевої затримки та ймовірності втрат пакетів як уздовж основного, так і резервного шляху (шляхів) мережі.

5. Уперше запропоновано систему тензорних моделей маршрутизації та швидкої перемаршрутизації мультимедійного трафіку із забезпеченням якості сприйняття послуг, що надаються кінцевим користувачам у телекомунікаційній мережі за показником мультимедійної якості, під час реалізації схем захисту каналів, вузлів і маршруту (маршрутів). Використання тензорного підходу дозволило забезпечити заданий рівень QoE шляхом синхронного контролю в межах однієї мультимедійної сесії значень середньої міжкінцевої затримки та

ймовірності втрат для голосового та відеопотоків пакетів як уздовж основного, так і резервного шляху (шляхів) у мережі.

6. Отримала подальший розвиток декомпозиційна модель міждоменної маршрутизації із забезпеченням якості обслуговування в телекомунікаційній мережі, яка складається з множини послідовно з'єднаних доменів. Новизною запропонованої моделі маршрутизації є модифікація умов збереження потоку, що дозволило сформулювати умови забезпечення міжкінцевої якості обслуговування в мультидоменних телекомунікаційних мережах за показниками пропускної здатності та середньої міжкінцевої затримки пакетів.

7. Подальшого розвитку набули методи ієрархічно-координаційної маршрутизації в мультидоменних телекомунікаційних мережах. Новизною першого методу є забезпечення нормованої за доменами середньої міжкінцевої затримки пакетів, коли виконання нормованих вимог щодо якості обслуговування забезпечується в кожному домені окремо, а координація маршрутних рішень здійснюється за умовами міждоменної взаємодії. Новизна другого методу полягає в тому, що координація маршрутних рішень здійснюється як за умовами міждоменної взаємодії, так і за умовами забезпечення наскрізної середньої затримки пакетів у ТКМ загалом.

8. Отримав подальший розвиток метод ієрархічно-координаційної відмовостійкої маршрутизації в мультидоменних телекомунікаційних мережах. Новизною методу є забезпечення захисту рівня якості обслуговування в мультидоменних ТКМ за показниками пропускної здатності та середньої міжкінцевої затримки пакетів під час резервування (захисту) міждоменних маршрутизаторів у процесі розрахунку основних і резервних шляхів, що дозволило підвищити масштабованість та відмовостійкість маршрутних рішень.

**Обґрунтованість і достовірність наукових результатів, висновків і рекомендацій**, сформульованих у дисертаційній роботі, забезпечувалася коректним використанням положень добре апробованого математичного апарату, представленого елементами теорії множин, теорії графів, тензорного обчислення та аналізу, методами математичного програмування, а також

належним обґрунтуванням прийнятих гіпотез і наближень, наочністю та чіткою фізичною інтерпретацією результатів дослідження. Крім того, адекватність отриманих результатів підтверджувалася допустимою збіжністю результатів аналітичних розрахунків та імітаційного моделювання.

**Використання результатів роботи на практиці.** Практична цінність результатів дослідження полягає в тому, що запропоновані в дисертації моделі та методи мають стати основою математичного та алгоритмічного забезпечення перспективних протоколів відмовостійкої маршрутизації (швидкої перемаршрутизації) як в традиційних ТКМ, так і програмно-конфігурованих. Застосування запропонованих рішень дозволяє покращити рівень якості обслуговування в мережі. У порівнянні з математичними моделями, заснованими на маршрутних метриках, виграш у значеннях середньої міжкінцевої затримки пакетів складав від 6-12% до 18-30%; у порівнянні з рішеннями Traffic Engineering – від 5-8% до 21,5-24%. В залежності від завантаженості мережі виграш щодо значень R-фактору складав в середньому від 12 до 25%. Виграш щодо рівня мультимедійної якості вдалося забезпечити в середньому на 16-26%. Отримані в дисертаційній роботі результати були використані на підприємстві «ХДРНТЦ ТЗІ», ТОВ «Воркнест» та ПрАТ «Фарлеп-Інвест», а також впроваджені в навчальному процесі кафедри інфокомунікаційної інженерії ім. В. В. Поповського Харківського національного університету радіоелектроніки (ХНУРЕ): в лекційному курсі й на практичних заняттях з дисциплін «Маршрутизація в ТКС», «Алгоритми управління та адаптації в ТКС» і «Telecommunication transmission systems» для підготовки студентів зі спеціальності 172 – Телекомунікації та радіотехніка.

**Повнота викладення матеріалів дисертації в публікаціях та особистий внесок в них автора.** Усі основні наукові результати, висвітлені в дисертаційній роботі, здобувач отримав самостійно. Крім того, у роботі [66] здобувачем проведено дослідження на низці розрахункових прикладів удосконаленої потокової моделі відмовостійкої маршрутизації із захистом шляху на підставі використання білінійного критерію оптимальності

маршрутних рішень; у статті [67] автором проаналізовано та визначено проблеми забезпечення ефективного балансування навантаження в мережах MPLS-TE; у публікації [68] дисертантом розроблено та досліджено тензорну модель багатошляхової QoS-маршрутизації в інфокомунікаційній мережі із забезпеченням необхідного рейтингу якості; у роботі [69] здобувачем проаналізовано теоретичні рішення щодо відмовостійкої маршрутизації в ТКМ; у публікації [70] автором досліджено процеси міжмоєнної маршрутизації в магістральних мережах; у статті [71] здобувачем досліджено ефективність рішень щодо багатошляхової швидкої перемаршрутизації з локальним захистом та захистом пропускнує здатності; у роботі [72] автором досліджено дворівневий метод маршрутизації в програмно-конфігурованій мережі, який адаптований для використання на SDN-контролері з багатоядерною архітектурою; у праці [73] здобувачем досліджено особливості моделі структурно-функціональної самоорганізації в безпроводових mesh-мережах; у статті [74] дисертантом досліджено метод оцінювання впливу атак на телекомунікаційну мережу з урахуванням наявних уразливостей для підвищення відмовостійкості мережі загалом; у публікації [75] здобувачем досліджено відмовостійкість IoT пристроїв щодо тривалості їхнього життя під час безпечної передачі даних; у статті [76] автором проаналізовано проактивний підхід щодо оцінки мережної безпеки, який дозволяє оцінити ризики на рівні користувача та мережі через присутність уразливостей; у праці [77] здобувачем досліджено процеси швидкої перемаршрутизації із забезпеченням балансування навантаження на принципах Traffic Engineering та диференційованого обмеження трафіку в територіально розподілених програмно-конфігурованих мережах; у статті [78] автором розроблено математичну модель швидкої перемаршрутизації із захистом рівня якості обслуговування за показниками пропускнує здатності та ймовірності втрат пакетів для трафіку даних; у роботі [80] дисертантом досліджено моделі швидкої перемаршрутизації із реалізацією схем захисту шляху та пропускнує здатності в програмно-конфігурованих мережах; у публікації [81] здобувачем

розроблено та досліджено метод ієрархічно-координаційної міждоменої маршрутизації в програмно-конфігурованій телекомунікаційній мережі із забезпеченням нормованої якості обслуговування; у статті [82] автором удосконалено потокову модель маршрутизації в мультисервісній телекомунікаційній мережі із забезпеченням якості обслуговування; у роботі [83] здобувачем розроблено та досліджено оптимізаційну модель маршрутизації чутливого до затримок трафіку в інфокомунікаційних мережах; у публікації [84] дисертантом запропоновано та досліджено метод ієрархічної міждоменої маршрутизації в програмно-конфігурованій телекомунікаційній мережі із забезпеченням міжкінцевої якості обслуговування; у статті [85] автором удосконалено та досліджено потокову модель швидкої перемаршрутизації в інфокомунікаційній мережі із захистом рівня якості обслуговування за множиною показників; у праці [86] здобувачем розроблено та досліджено тензорну модель швидкої перемаршрутизації із забезпеченням рівня якості обслуговування за показниками пропускної здатності, середньої затримки та ймовірності втрат пакетів; у публікації [87] дисертантом досліджено потокову модель маршрутизації в безпроводових mesh-мережах; у статті [90] автором досліджено модель швидкої перемаршрутизації із балансуванням навантаження та контролем трафіку на основі відносних пріоритетів; у роботі [91] здобувачем досліджено тензорну багатопотокову модель маршрутизації самоподібного трафіку із забезпеченням якості обслуговування на основі балансування навантаження в телекомунікаційній мережі; у статті [92] автором досліджено процеси швидкої перемаршрутизації з балансуванням навантаження на основі принципів Traffic Engineering та диференційованого контролю трафіку в ТКМ; у роботі [93] здобувачем досліджено процеси швидкої перемаршрутизації з реалізацією схеми захисту шляху та пропускної здатності.

**Апробація.** Основні результати дисертації доповідалися та були схвалені на 37 Міжнародних наукових конференціях, форумах і семінарах [94–130], зокрема: на XIII, XIV та XV Міжнародних IEEE конференціях «Modern

Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science (TCSET)» (Львів, Славське, НУ ЛП, 2016, 2018, 2020); на III–VI Міжнародних науково-технічних IEEE конференціях «Problems of Infocommunications Science and Technology (PIC S&T)» (Харків, ХНУРЕ, 2016–2019); на I Міжнародній конференції «Advanced Information and Communication Technologies-2015» (AICT-2015) (Львів, НУ ЛП, 2015); на 13-й науковій конференції Харківського університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба «Новітні технології – для захисту повітряного простору» (Харків, ХУПС ім. І. Кожедуба, 2017); на III і V Міжнародних науково-технічних конференціях «Проблеми електромагнітної сумісності перспективних безпроводових мереж зв'язку» (EMC-2017, EMC-2019) (Харків, ХНУРЕ, 2017, 2019); на II і III Міжнародній IEEE конференції «Advanced Information and Communication Technologies (AICT)» (Львів, НУ ЛП, 2017, 2019); на XIII Міжнародній IEEE конференції «Computer Sciences and Information Technologies (CSIT)» (Львів, НУ ЛП, 2018); на III і IV Міжнародних IEEE конференціях «Radio Electronics & Info Communications (UkrMiCo)» (Київ, Одеса, НТУУ «КПІ», ОНАЗ ім. О. С. Попова, 2018, 2019); на VII Міжнародній науково-практичній конференції «Фізико-технологічні проблеми передавання, оброблення та зберігання інформації в інфокомунікаційних системах» (Чернівці, ЧНУ ім. Ю. Федьковича, 2018); на XV Міжнародній IEEE конференції «The Experience of Designing and Application of CAD System in Microelectronic (CADSM)» (Поляна-Свалява, НУ ЛП, 2019); на XII та XIII Міжнародних науково-технічних конференціях «Проблеми телекомунікацій» (Київ, НТУУ «КПІ», 2018, 2019); на XIV Міжнародній науково-технічній конференції «ABIA-2019» (Київ, НАУ, 2019); на III Міжнародній науково-технічній конференції «Комп'ютерні та інформаційні системи і технології» (м. Харків, ХНУРЕ, 2019); на Міжнародній IEEE конференції «Information and Digital Technologies (IDT 2019)» (Жиліна, Словаччина, 2019); на II Міжнародній IEEE конференції «Electrical and Computer Engineering (UKRCON)» (Львів, НУ ЛП, 2019); на X Міжнародній IEEE конференції «Intelligent Data Acquisition and

Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS)» (Мец, Франція, 2019); на Міжнародній IEEE конференції «Advanced Trends in Information Theory (АТІТ)» (Київ, КНУ ім. Т. Шевченка, 2019); на IV Міжнародній науково-технічній конференції «Computer and Information Systems and Technologies» (Харків, ХНУРЕ, 2020); на XI Міжнародній IEEE конференції «Dependable Systems, Services and Technologies (DESSERT'2020)» (Київ, 2020).

**Публікації.** За матеріалами дисертації опубліковано 65 робіт, зокрема 28 статей: з них 14 – у наукових фахових виданнях України [66, 67, 69, 72, 74, 77–79, 82–85, 88, 93] та 14 статей – у закордонних журналах [68, 70, 71, 73, 75, 76, 80, 81, 86, 87, 89–92], 13 з яких індексуються наукометричною базою Scopus [68, 70, 71, 73, 75, 80, 81, 86, 87, 89–92]. Здобуті результати та висновки апробовано на 37 Міжнародних наукових конференціях та форумах [94–130], з яких 25 – на конференціях, що проходили під егідою IEEE та індексуються наукометричною базою Scopus [94, 95, 99–102, 104–108, 110, 116–127, 130].

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертація складається зі вступу, шести розділів і трьох додатків. У роботі 144 рисунки та 36 таблиць. Загальний обсяг роботи становить 476 сторінок, з них 330 сторінок основного тексту, 31 сторінка з рисунками й таблицями, 20 сторінок із анотацією та 34 сторінки з додатками. Список використаних джерел містить 365 найменувань, викладених на 47 сторінках.



## РОЗДІЛ 1

### АНАЛІЗ СТАНУ ПРОБЛЕМИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ВІДМОВОСТІЙКОСТІ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ МЕРЕЖ ЗАСОБАМИ МАРШРУТИЗАЦІЇ

#### **1.1. Аналіз сучасного стану та тенденцій розвитку програмно-конфігурованих телекомунікаційних систем і мереж**

Важливою тенденцією в розвитку сучасних телекомунікаційних систем та мереж є впровадження програмно-конфігурованих рішень. Програмно-конфігуровані територіально-розподілені мережі (Software-Defined Networking in a Wide Area Network (SD-WAN) розглядаються як перспективна архітектура глобальних телекомунікаційних рішень наступного покоління. Оскільки SD-WAN є комплексними мережними інфраструктурами, які функціонують для надання якісних і складних послуг, що широко висвітлено в дослідженнях останніх років [134–154], виникає необхідність аналізу можливостей та проблем, які постають у використанні нових технологічних рішень і протоколів у програмно-конфігурованих мережах загалом.

#### **1.1.1. Значення програмно-конфігурованих мереж у цифровій трансформації суспільства**

Цифрова трансформація є глибокими змінами ділової та організаційної діяльності, процесів, компетенцій і моделей з метою повного використання всіх можливостей поєднання цифрових технологій. Ця трансформація вже здійснюється та має значний стратегічний вплив на суспільство та спричиняє багато змін [131–139]. Для корпорацій і підприємств цифрова трансформація надає можливості сучасним технологічним рішенням кардинально підвищити ефективність діяльності та охопити сферу бізнесу. Безшовні комунікації між кінцевими користувачами та постачальниками послуг призводять до

фундаментального переосмислення ролі технологій та застосунків у взаємодії стейкхолдерів бізнес-процесів.

Варто зазначити, що екосистема інформаційно-комунікаційних технологій (ІКТ) є головним рушієм цифрової трансформації. На основі ІКТ відбувається конвергенція п'яти ключових технологій, які перетворюють сучасний світ: програмно-конфігуровані мережі, що працюють на основі SDN/NFV, зокрема концепція SD-WAN та мережі мобільного зв'язку 5G, хмарні технології (Cloud Computing), засоби штучного інтелекту (Artificial Intelligence, AI), аналітика великих даних (Big Data) та широке застосування Інтернету речей (Internet of Things, IoT) [135, 138]. Кожна з цих технологій матиме власний величезний вплив як на ІКТ, так і на всі основні галузеві вертикалі, що залежать від ІКТ послуг. Однак поєднання цих технологій створить більше можливостей для значного впливу та покращення взаємодії користувачів із комунікаціями, програмами, цифровим контентом та комерцією.

З точки зору якості обслуговування користувача, підприємство може розглядати будь-яку або всі перелічені нижче причини використання SD-WAN, що забезпечують значні переваги цієї технології побудови мережі порівняно з традиційними WAN та сприяє зменшенню капітальних та експлуатаційних витрат. Загалом, як показано на рис. 1.1, привабливість SD-WAN як технології для використання в процесі розгортання корпоративних мереж містить економію витрат та рентабельність інвестицій, використання загальнодоступної мережі Інтернет, хмарних сервісів, незалежність від транспортної технології, прозорість управління, забезпечення гнучкості та підвищеної безпеки [138].

### **1.1.2. Аналіз проблеми забезпечення відмовостійкості програмно-конфігурованих мереж**

Статична та негнучка архітектура традиційних ТКМ рівня WAN не відповідає сучасним тенденціям та вимогам щодо QoS/QoE користувачів.

До того ж широко обговорюється, що SD-WAN, транспортні програмно-конфігуровані мережі (Transport SDN) та гібридні SDN (Hybrid SDN) здатні замінити традиційні транспортні мережі та технології.



Рис. 1.1. Переваги SD-WAN для корпоративних мереж [138]

Адже основною метою програмно-конфігурованих ТКМ є спрощення функціонування мережі, оптимізація управління та впровадження інновацій і гнучкості порівняно із традиційними архітектурами [135, 137]. Далі проведено аналіз логічних і фізичних архітектур програмно-конфігурованих ТКМ [138–140]. Як показано на рис. 1.2, відповідно до [139] логічна архітектура SD-WAN складається з трьох рівнів, а саме: рівень даних, рівень управління та рівень додатків [140].

Зі свого боку функції рівня даних можна класифікувати на віртуалізацію пропускну здатності та передачу даних. Як правило, SD-WAN має у своєму складі кілька видів мереж, наприклад, MPLS, Інтернет, 4G тощо. Для повного використання мережних ресурсів віртуалізація пропускну здатності поєднує канали зв'язку мережі у пул ресурсів, доступний для всіх застосунків і сервісів. Передавання даних складається з розподіленої множини мережних елементів (переважно комутаторів), які відповідають за передавання пакетів із

використанням мережних ресурсів, що забезпечується віртуалізацією пропускної здатності. Обидва вони отримують команди від контролера мережі верхнього рівня через інтерфейсні протоколи, такі як OpenFlow [139].

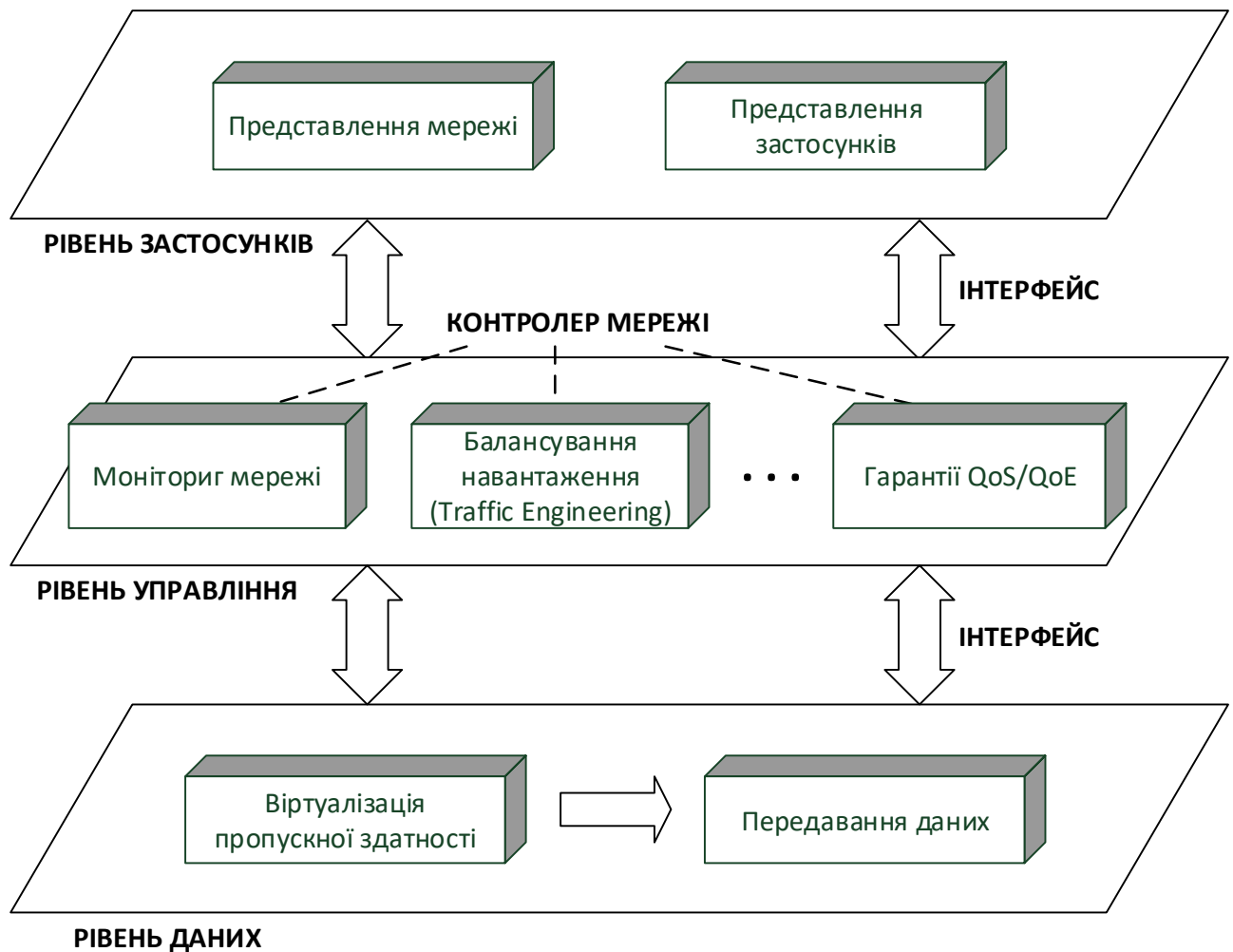


Рис. 1.2. Приклад логічної архітектури SD-WAN [137, 139]

На рівні управління виокремлюють множину мережних функцій, що реалізуються та управляються незалежно [141]. Окрема реалізація цих функцій дозволяє операторам мереж розробляти, модифікувати, налагоджувати та видаляти будь-яку одну з них незалежно від інших. Проте мережні функції також можуть бути об'єднані для створення різноманітних послуг та збільшення гнучкості програмно-конфігурованої ТКМ [142]. Наприклад, моніторинг мережі забезпечує необхідною інформацією, потрібною для

реалізації TE, за допомогою якої обчислюється оптимальне рішення щодо балансування навантаження в процесі управління трафіком у мережі [143, 144]. Так само гарантія якості обслуговування відповідає за задоволення вимог застосунків і сервісів під час передачі даних [145].

Прикладний рівень дозволяє провайдерам мереж та розробникам застосунків заявляти свої специфічні вимоги до мережі за допомогою представлення мережі та застосунків, обидва з яких здатні перекласти вимоги високого рівня, виражені майже натуральною мовою, у відповідні конфігурації мережі [146]. Оскільки все більше й більше додатків висувають багатовимірні вимоги, а іноді такі вимоги суперечливі, необхідне налаштування мережних політик з урахуванням характеристик відповідних застосунків [18]. Наприклад, послуга потокового відео в реальному часі очікує високої швидкості передачі даних та низької затримки для задоволення вимог користувачів, тоді як такі завдання конфліктують між собою. За допомогою представлення застосунків їхні розробники можуть заявити про свої стратегії щодо вирішення жорстких вимог і розв'язувати їх на базі транспортної мережі. Подібно до представлення додатків, представлення мережі розроблено для звітування про вимоги до мережі, таких як рентабельне [147] та багатоцільове використання мережі [145]. Рівень застосунків дозволяє провайдерам мереж і розробникам застосунків брати більшу участь в управлінні мережею.

Фізичну архітектуру програмно-конфігурованої територіально-розподіленої ТКМ у загальному випадку можна представити таким чином. Рівень даних містить набір SDN-комутаторів, взаємопов'язаних між собою фізичними каналами зв'язку [140], що керуються контролером мережі. Як правило, контролер мережі – це сервер або кластер серверів залежно від розміру та складності мережі SD-WAN [148], який відповідає за виконання окремих мережних функцій. Над контролером мережі функціонують конкретні застосунки (програми). Розробники застосунків і провайдери мереж можуть висувати свої вимоги до контролера мережі, який транслює їх у відповідні політики та конфігурації. Здебільшого на практиці для підвищення

відмовостійкості використовуються декілька контролерів, розподілених на різних вузлах мережі, зокрема один обирається головним контролером, а інші – резервними [149]. Отже, коли головний контролер мережі виходить з ладу, його завдання починає виконувати один із резервних контролерів [140].

Результати чисельних досліджень останніх років показали, що основними викликами, які постають перед контролером мережі SD-WAN, є масштабованість, узгодженість рішень в управлінні територіально-розподіленою мережею та її відмовостійкість [2, 6, 10, 12–14, 17, 138, 139, 150]. До того ж з метою підвищення масштабованості використовується множина пов'язаних контролерів, що застосовуються мережею та дозволяють організувати централізоване управління, гарантуючи певний рівень масштабованості та гнучкості [140]. Крім того, загальний прикладний програмний інтерфейс (Application Programming Interface, API) застосовується для досягнення компромісу між узгодженістю, тривалістю функціонування та відмовостійкістю.

Основними причинами, що призводять до відмов в обслуговуванні в ТКМ, є масштабні техногенні катастрофи та людський чинник (помилки інженера-адміністратора мережі, людини-оператора тощо), компрометація мережного обладнання, екологічні проблеми тощо [2, 6, 10, 12–14, 17, 150]. Якщо причиною є технологічні чинники, то, як правило, це відмови фізичного рівня, апаратного або програмного забезпечення ТКМ: збої та/або перевантаження мережних пристроїв, помилки в конфігурації та оновленні мережного програмного забезпечення.

Чіткі вимоги до масштабованості та стійкості до відмов і збоїв у мережі SD-WAN роблять використання розподіленої площини управління необхідною умовою для забезпечення узгодженості рішень щодо управління. Водночас треба зазначити складність організації логічної централізованості площини управління через неможливість забезпечити синхронізованість оновлень стану мережі, зберігаючи її повноцінне функціонування.

Такі збої, як відмови пристроїв та каналів зв'язку, є поширеними для територіально-розподілених мереж і значно впливають на її продуктивність, що погіршується за умови відсутності відповідних механізмів відновлення для забезпечення необхідного рівня надійності та відмовостійкості. Оскільки наявні рішення щодо відновлення після відмов каналів зв'язку в традиційних мережах можуть бути адаптовані під використання їх у програмно-конфігурованих мережах, значна увага дослідників і розробників приділяється створенню технологічних рішень забезпечення відмовостійкості вузлів SD-WAN – контролерів і комутаторів.

Також на рівні управління територіально-розподілених мереж мають реалізовуватися мережні функції, які відповідають за моніторинг мережі, трафік інжиніринг (TE), гарантії щодо рівня якості обслуговування (QoS), які безпосередньо залежать від вимог використовуваних застосунків, тощо.

*Моніторинг мережі* – важлива функція управління мережею, оскільки допомагає операторам мереж визначати стан її та компонентів. Трафік інжиніринг, гарантування QoS і виявлення аномалій також залежать від моніторингу мережі для прийняття відповідних рішень. Оскільки парадигма програмно-конфігурованих мереж стає все більш популярною для виконання завдань управління, моніторингу мережі приділяється значна увага [151]. За останні кілька років OpenFlow [152] став найпоширенішим південним інтерфейсом у SDN і SD-WAN. Він забезпечує механізм збору статистики на рівні потоку з площини даних і надає високорівневий інтерфейс для збору статистики за кожним потоком, так і загальної статистики, яка може використовуватися мережними функціями для моніторингу стану мережі, незалежно від деталізації низького рівня. Для того, щоб спростити дизайн комутатора, цей механізм збору статистики реалізований як послуга на основі pull-based, тобто мережні програми та контролер мережі періодично запитують комутатори щодо статистики потоку.

Розподілені протоколи, такі як OSPF/IS-IS, є домінуючими рішеннями маршрутизації в IP мережах [153], а простота в реалізації сприяла їхньому

значному поширенню. Однак за останні роки мережі швидко зросли в розмірах і складності, що збільшило вплив недоліків цих протоколів маршрутизації. Наприклад, навіть найкращі налаштування вагового коефіцієнта каналу зв'язку можуть призвести до маршрутизації, яка значно відхиляється від оптимальних порядків маршрутизації [154]. Крім того, низьке використання ресурсів, спричинене OSPF, є проблематичним для операторів мережі. Вони змушені надмірно забезпечити свої мережі для оброблення пікового трафіка. Як наслідок, більшість каналів зв'язку працює в середньому лише на 30–40 % [153]. Отже, у програмно-конфігурованій мережі стимулюється оптимізація трафіка, а також використовується в мережах обробки даних [24, 143, 144].

Зі свого боку нові застосунки, такі як сервіси потокового відео, мають щораз більші очікування щодо якості сприйняття (QoE) [10, 145]; вони вимагають надання QoS-орієнтованого обслуговування, зокрема в умовах відмов апаратного або програмного забезпечення SDN.

## **1.2. Класифікація аспектів якості відповідно до стандарту еталонної моделі взаємодії відкритих систем**

Базове поняття якості в телекомунікаційних системах насамперед визначається відповідно до стандарту еталонної моделі взаємодії відкритих систем (Open System Interconnection, OSI) [155–157]. Класифікація якості на основі OSI та стек протоколів TCP/IP зображена на рис. 1.3, як це запропоновано в роботі [155]. Як видно з рисунка, якість охоплює всі сім рівнів OSI – від фізичного до прикладного рівня та може бути класифікована щодо відмовостійкості телекомунікаційних систем і мереж таким чином:

- якість обслуговування (Quality of service, QoS);
- якість сприйняття (Quality of experience, QoE);
- якість доставки (Quality of delivery, QoD);
- якість захисту (Quality of protection, QoP).



Відповідно до рекомендації ITU-T E.800 [158], якість обслуговування визначається як сукупність характеристик телекомунікаційної послуги, що враховують її здатність задовольняти заявлені та ймовірні потреби користувача цієї послуги. Водночас варто зазначити, що характеристики мають бути спостережуваними та/або вимірюваними. Далі, якщо характеристики визначені, вони стають параметрами та виражаються певними метриками. Залежно від місця моніторингу та вимірювання рівня якості обслуговування QoS-показники можуть належати до класу показників мережної продуктивності (NP), якщо вони фіксуються на рівні мережних пристроїв, або до класу QoE-показників, якщо вони визначаються на рівні кінцевого користувача [158–182].

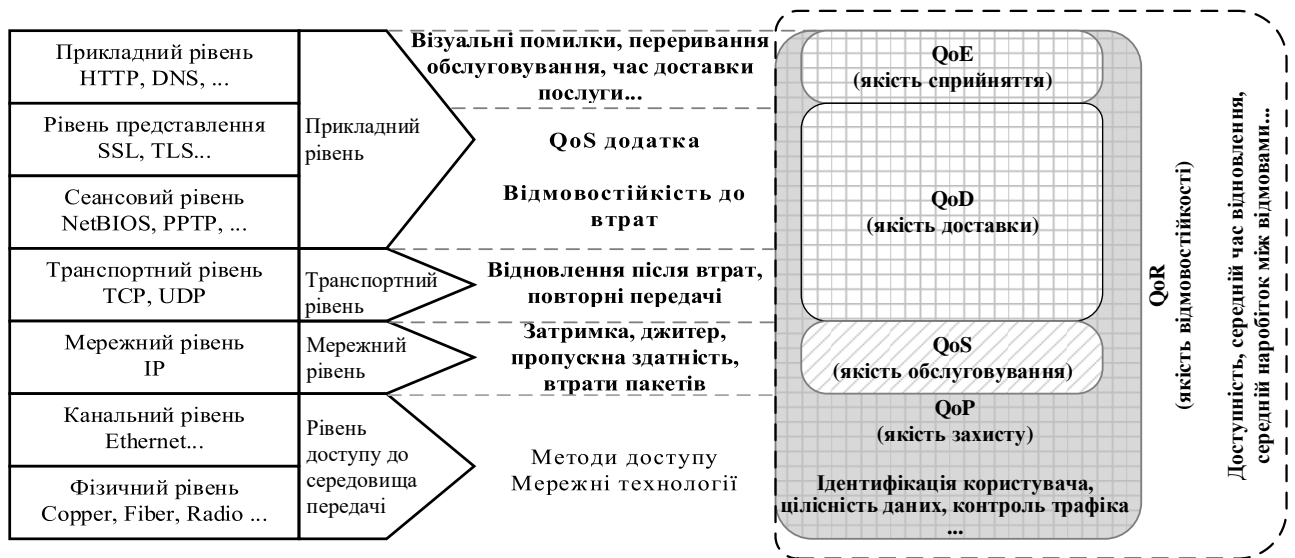


Рис. 1.3. Класифікація якості на основі моделей OSI та TCP/IP стосовно відмовостійкості [155]

Трьом основним критеріям класифікації додатків (передбачуваність швидкості трафіка, чутливість до затримок і втрат пакетів) відповідають три групи NP-показників, які використовуються для забезпечення необхідного рівня якості обслуговування [150, 165]:

- показники пропускної здатності, що містять середню, максимальну (пікову) і мінімальну швидкості передачі пакетів;

- часові параметри, до яких належать середня та максимальна затримка, а також середня та максимальна варіація затримок пакетів (джитер);
- показники надійності передачі, що, як правило, кількісно характеризують відсоток втрачених та/або спотворених пакетів.

Крім того, на практиці та в процесі досліджень інколи використовуються і узагальнені QoS-показники, у межах яких поєднані перелічені показники мережної продуктивності. Так, наприклад, імовірність вчасної затримки пакетів визначається відношенням кількості пакетів, які надійшли до отримувача за встановлений час, до загальної кількості переданих пакетів. Тобто цей QoS-показник узагальнює часові показники та показники надійності.

З іншого боку, рекомендація ІТУ-Т Р.10/G.100 [183] подає якість сприйняття QoE як ступінь задоволення чи незадоволення користувача застосунком або послугою. До того ж QoE визначається шляхом оцінки користувачем відповідно до його очікувань та потреб щодо корисності та/або задоволення послугою з боку користувача у певному контексті (інтеракційному, ситуативному та соціокультурному) [155]. Відповідно до рекомендацій ІТУ-Т G.107 [176] та G.1070 [177], до основних QoE-показників належать рейтинг якості, що для VoIP-потоків визначається через R-фактор, та показник мультимедійної якості (MMq), який також використовується для обслуговування трафіка відеотелефонії.

Так само у [184] якість доставки (QoD) описана за допомогою якісних характеристик процесу передачі даних на транспортному та прикладному рівнях. Очевидно, що QoD може характеризуватися такими параметрами, що беруть участь у процесах доставки даних на зазначених вище рівнях, тобто процедурах відновлення після відмов, втрати пакетів, процесах повторної передачі, оброблення даних, управління потоками, цілісності даних тощо.

Розглянемо більш детально такий показник QoD, як імовірність вчасної доставки. Відповідно до класифікації показників мережної продуктивності він належить до вторинних (узагальнених) показників, які поєднують низку первинних, у зазначеному випадку часових, показників та показники надійності

доставки пакетів [185]. Крім того, на практиці обчислення та використання показника ймовірності вчасної доставки пов'язані з типом і характеристиками даних, що передаються.

Якість захисту (QoP) [186] дозволяє вимірювати та описувати рівень захисту телекомунікаційних систем і мереж, а також послуг. Зазначається, що QoP фокусується на внутрішніх загрозах та визначає характеристики ТКС або послуги з точки зору операційної безпеки на кожному рівні OSI відповідно до вимог безпеки. Такі характеристики представляють контроль доступу, перевірку ідентифікації користувача (автентифікація, авторизація тощо), шифрування даних, контроль трафіка, фізико-логічне відображення адрес, маршрутизацію тощо. У визначенні рівня QoP варто згадати такий параметр мережної безпеки, як імовірність компрометації пакета, вузла, каналу та шляху ТКМ, який враховується в рішеннях щодо безпечної маршрутизації, а також безпечної швидкої перемаршрутизації [187].

Проте характеристика надійності телекомунікаційних систем і мереж, а також послуг може бути здійснена за допомогою показників якості відмовостійкості (Quality of Resilience, QoR). Загалом рівень QoR є гарантією відновлення після виникнення відмов, збоїв і несправностей у ТКМ. Отже, QoR також визначає ймовірність доступності мережі, системи або послуги. У цьому випадку QoR [188] містить множину параметрів QoS, QoE, QoD і QoP і може бути виражений такими показниками, як доступність, середній час відновлення (Mean Time To Recovery, MTTR), середній час між відмовами (Mean Time Between Failures, MTBF) тощо (табл. 1.1).

Фізичний зміст якості в ТКМ може бути описаний взаємозв'язком різних чинників якості, які впливають на загальний процес надання послуги або на продуктивність мережі або системи. На рис. 1.4 показано взаємозв'язок між QoS, QoD, QoE та їхньою кореляцією з QoP і QoR [155].

### Параметри відмовостійкості відповідно до стандартів ІТУ-Т [189]

Стандарти	Параметри відмовостійкості
Загальне застосування	
E.800 E.802 E.820 E.850 E.855 E.860 E.862 E.880	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Миттєва (не)доступність – імовірність того, що елемент мережі перебуває у (не)працездатному стані на визначений момент часу.</li> <li>– Середній час між відмовами (Mean time between failures, MTBF) – середній час між двома послідовними відмовами відновленого елемента.</li> <li>– Середній час між перериваннями (Mean time between interruptions, MTBI) – середній час між закінченням одного переривання в роботі та початком наступного.</li> <li>– Середній час до відмови (Mean time to failure, MTTF) – середнє значення часу з моменту останньої зміни непрацездатного стану на працездатний до наступної відмови.</li> <li>– Середній час відновлення (Mean time to recovery, MTTR) – середнє значення часу, коли елемент мережі перебуває у стані відмови через несправність.</li> <li>– Середній час роботи / середній час простою (Mean up time / mean down time, MUT/MDT) – середнє значення часу, коли елемент мережі перебуває в працездатному / непрацездатному режимі.</li> <li>– Функція надійності <math>R(t)</math> – імовірність того, що елемент мережі перебуває у стані працездатності на інтервалі <math>(0, t)</math>.</li> <li>– Відновлюваність – імовірність того, що послуга надаватиметься надалі.</li> </ul>

Продовження таблиці 1.1

IP мережі	
Y.1540 Y.1541 Y.1542	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Коефіцієнт втрат IP-пакетів (IP packet loss ratio, IPLR) – загальна кількість втрачених пакетів, поділена на загальну кількість переданих пакетів.</li> <li>– Доступність обслуговування – частка загального часу обслуговування, класифікованого як доступного з урахуванням порогового значення IPLR.</li> <li>– (Не)доступність IP-послуги (Percent IP service unavailability, PIU / Percent IP service availability, PIA) – частка часу (не)доступної IP-послуги на основі функції (не)доступності IP-послуги (<math>PIU = 100 - PIA</math>).</li> </ul>
MPLS мережі	
Y.1561	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Коефіцієнт втрати пакетів (Packet loss ratio, PLR) – подібний до IPLR.</li> <li>– Блок значних втрат (Severe loss block, SLB) – подія на вхідному вузлі для блоку пакетів із коефіцієнтом втрати пакетів над верхньою межею.</li> <li>– Час відновлення – час для операцій відновлення на основі кількості послідовних інтервалів часу подій SLB.</li> <li>– Доступність послуги, PIU, PIA – визначається так само, як у Y.1540, але в контексті SLB.</li> </ul>
Протоколи вищих рівнів	
Y.5162	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Доступність послуги – подібна до Y.1540, але пов'язана із затримкою передачі та коефіцієнтом успішності обслуговування.</li> </ul>

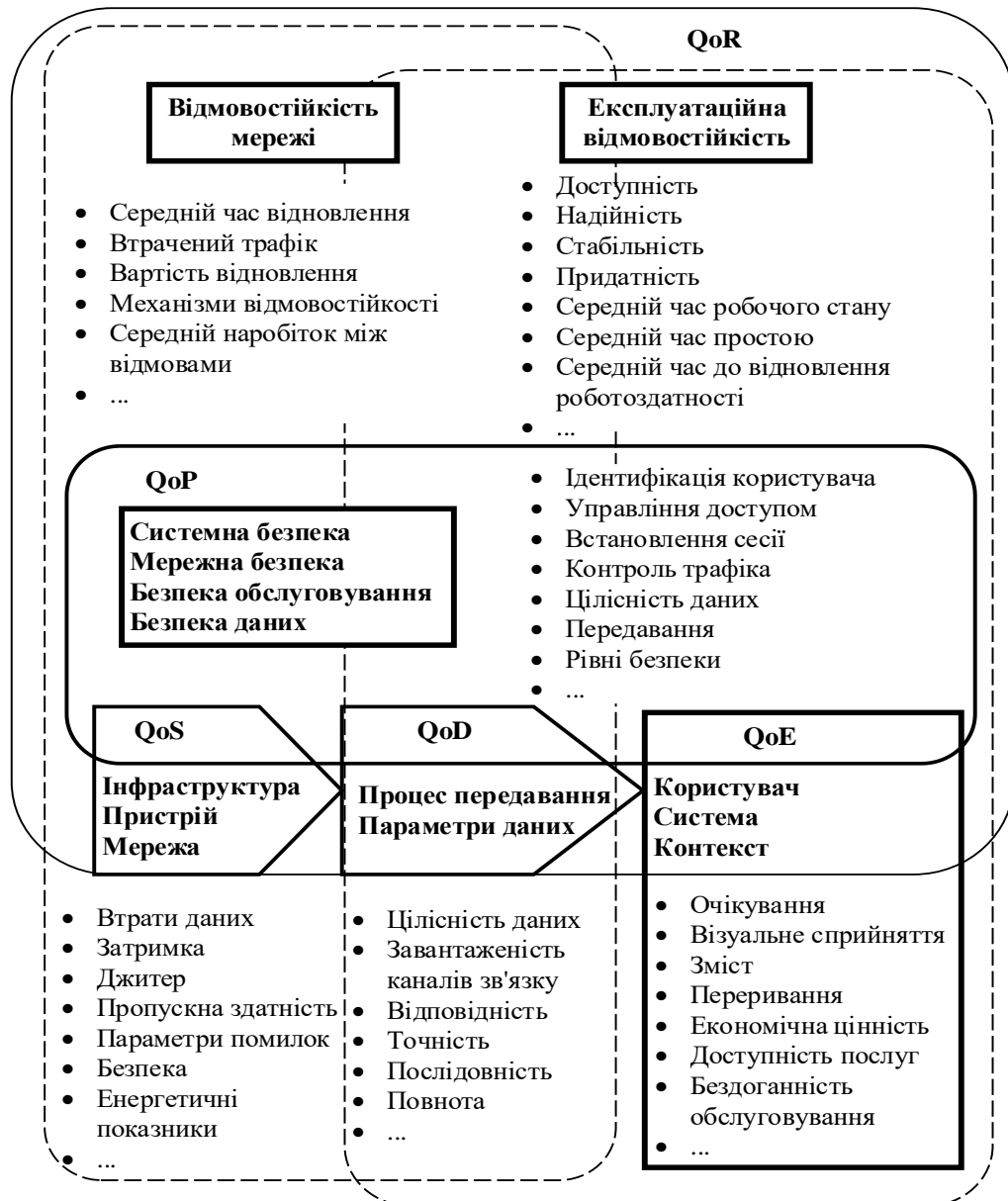


Рис. 1.4. Взаємозв'язок між QoS, QoD, QoE, QoP і QoR [155]

Зазначається, що на QoS впливають структурні параметри, які також позначаються й на характеристиках, які охоплюють якість доставки.

До того ж чинники, що впливають на QoD, здебільшого пов'язані з функціональними параметрами комунікаційного процесу. Це означає, що всі характеристики цього процесу, такі як протоколи маршрутизації, механізми оброблення даних та відновлення після відмов тощо, впливають на нього [155]. Перцептивна оцінка якості послуги, її повноти, співвідношення ціна/якість послуг тощо проводиться користувачами ТКМ. Будь-яке погіршення характеристик QoS і QoD може спричинити значний вплив на очікування

користувачів щодо застосунків чи послуг. Крім того, будь-які вразливості системи або мережі впливають на надання послуг або передачу даних, що також може створити критичні ситуації для користувачів ТКМ.

Як зазначено в [155], характеристики QoS і QoD добре корелюють з параметрами механізмів відмовостійкості мережі. З іншого боку, кореляція між характеристиками QoS і QoE забезпечує спільний внесок у рішення щодо відмовостійкості для адекватного та надійного надання послуги. Більше того, взаємозв'язок між характеристиками QoS, QoD і QoP та метриками QoE може допомогти створити нові рішення для підвищення відмовостійкості мереж або систем у разі збоїв [2, 27, 33, 34, 185–189]. Загалом взаємозв'язок між різними аспектами якості може бути корисним, наприклад, у таких напрямках:

- прогнозування майбутніх збоїв у роботі телекомунікаційної мережі;
- повідомлення про погіршення продуктивності послуги;
- захист службових даних із вищим пріоритетом;
- перенаправлення (перемашрутизація) даних;
- реконфігурація топології мережі.

### **1.3. Аналіз підходів щодо забезпечення QoS та QoE в сучасних телекомунікаційних системах і мережах**

#### **1.3.1. Аналіз методів оцінки QoE**

Для проведення аналізу наявних рішень у забезпеченні QoE-показників насамперед необхідно розглянути механізми їхньої оцінки. Зокрема відомо [68, 168–174], що для кожного типу трафіка, який передається (мова, відео, дані), використовуються два типи методів оцінки якості сприйняття QoE: суб'єктивні й об'єктивні (рис. 1.5). Як відомо, суб'єктивна оцінка якості сприйняття дає лише інтегральну оцінку якісних показників для переданого відео- та аудіотрафіка. Зазначений метод оцінки застосовується найчастіше в момент часу, коли аудіо- та відеоінформація, що передається, спотворюється, що

виникають у процесі кодування, стиснення, передачі, декодування тощо. Тому суб'єктивна оцінка якості сприйняття – це досить трудомісткий процес, пов'язаний із значними часовими затратами.

Методи оцінки QoE		
Суб'єктивні	Об'єктивні	
Mean Opinion Score (MOS) /ITU-T G.711, P.800	Quality Rating (R), на основі E-моделей /ITU-T G. 107, G.1011	Quality Rating (R), на основі QL-моделей /ITU-T G. 107, G.1011
Double Stimulus Impairment Scale (DSIS) /ITU-R BT.500	Root Mean Square Error (RMSE) /ANSI/BPI-2400-S-2015	Perceptual Objective Listening Quality Assessment (POLQA) /ITU-T Rec. P.863
Double-Stimulus Continuous Quality Evaluation (DSCQE) /ITU-T P.913	Signal-to-Noise Ratio (SNR) /ITU-R F.339-8	Perceptual Evaluation of Speech Quality (PESQ) /ITU-T Rec. P.862
Single-Stimulus Continuous Quality Evaluation (SSCQE) /ITU-R BT.500, P.913	Peak Signal-to-Noise Ratio (PSNR) /ITU-T J.340	Moving Picture Quality Metric (MPQM) /ITU-T G.711, P.800
Perceptual Speech Quality Measurement (PSQM) /ITU-T P.861, P.910	Picture Quality Ratio (PQR) /ITU-R T.24, G.1080	Video Quality Metric (VQM) /ITU-T J.149

Рис. 1.5. Класифікація методів оцінки якості сприйняття

Так, у [174] для оцінки відеопотоку в стандарті ITU-R BT.500-8-11 використовуються суб'єктивні метрики Single-Stimulus Continuous Quality Evaluation (SSCQE), Double Stimulus Impairment Scale (DSIS) і Double Stimulus Continuous Quality Scale (DSCQS). Ці метрики застосовують особливості людського зору й дозволяють оцінити за п'ятибальною шкалою різницю між оригінальним і спотвореним відеорядом на підставі статичних алгоритмів.

Також існує кілька робіт [190, 191], у яких для оцінки якості сприйняття



використовується метод Mean Opinion Score (MOS). Однак під час проведеного аналізу виявлено, що цей метод не дозволяє кількісно врахувати чинники, що впливають на якість обслуговування, а саме наскрізну (end-to-end) затримку та втрати пакетів. Тому застосування зазначеного методу в сучасних мережах не дозволяє контролювати якість у режимі реального часу і вчасно реагувати на можливі проблеми в мережі із запобіганням погіршення якості послуги.

В основу об'єктивних методів покладена так звана E-модель, представлена в роботах [164, 175] і пов'язана з вимірюванням характеристик терміналів і мереж. Ці методи оцінки враховують структурно-функціональні характеристики телекомунікаційних мереж, а також більше 20 різних параметрів для визначення фактора оцінки з'єднання (Transmission Rating Factor, R-Factor). До вимірюваних параметрів належать, наприклад, час проходження сигналу, варіації затримки (Jitter), втрата пакетів і піки втрат пакетів (Bursts). До того ж результатом обчислень відповідно до E-моделі є рейтинг якості (Quality Rating, QR). QR визначає рівень якості в мережі та дозволяє об'єднати в єдиному показнику як індивідуальні характеристики сигналів, так і мережні параметри передачі (затримку й величину втрат пакетів). Однак головним недоліком цього напрямку є відсутність прямої залежності між мережними параметрами та рейтингом якості.

У деяких роботах [190, 191] для оцінки якості сприйняття пропонується підхід, оснований на трафіку, що моделюється. У цьому випадку відомий тестовий сигнал передається через мережу з одного кінцевого вузла до іншого й на виході порівнюється з початковим сигналом еталонного значення. Зазначений підхід дозволяє проводити тестування від вузла до вузла з діагностичними цілями і, як правило, забезпечує кращу відповідність (від 0,9 до 0,95) до суб'єктивних вимірів MOS. Але головним з недоліків цього методу є потреба в додаткових мережних ресурсах і необхідності специфічних налаштувань мережного обладнання.

Для отримання об'єктивної оцінки якості також можуть використовуватися механізми Q-learning [192] на базі псевдосуб'єктивної

оцінки якості (PSQA), які базуються на виборі найкращого шляху, основанийого на зіставленні показників швидкості передачі та втрат пакетів у мережі. Також існує низка робіт [193], спрямованих на забезпечення QoE з точки зору типу трафіка, що передається (відео, дані, мова тощо), але ці підходи не дозволяють управляти мережними ресурсами.

### **1.3.2. Оптимізаційний підхід щодо забезпечення QoE**

Управління якістю сприйняття мультимедійних послуг передбачає постійну оптимізацію та динамічний контроль відповідних механізмів, починаючи від генерації контенту до його споживання кінцевим користувачем уздовж усього ланцюга надання послуг. Однією з головних цілей управління QoE є максимізація рівня якості сприйняття для кінцевих користувачів шляхом ефективного розподілу доступних мережних ресурсів. Однак варто зазначити, що з урахуванням усього шляху (ланцюга) доставки мультимедіа оптимізація та управління QoE є складним технологічним завданням, зокрема через неоднорідність пристроїв користувачів із підтримкою мультимедіа [194].

Дослідження щодо QoE моделювання, моніторингу, контролю та управління викликають значний інтерес у дослідницькому середовищі та пов'язані головним чином з передаванням мультимедійного контенту та відповідними комунікаційними процесами, а також управлінням потоковими послугами на основі QoE [194–213].

Отже, QoE-орієнтоване управління послугами потокової передачі мультимедійних даних складається з таких основних компонентів [194]:

1) моделювання та оцінювання QoE, що передбачає створення прогнозних математичних моделей (модель QoE) на основі даних, що стосуються ключових показників якості (Key Quality Indicators, KQIs);

2) моніторинг та вимірювання QoE, що полягає в моніторингу ключових показників якості служб мультимедійної потокової передачі та вимірюванні QoE за прогнозними моделями QoE;

3) оптимізація та контроль QoE, що переважно використовуються для оптимального використання мережних ресурсів за допомогою механізмів управління на основі результатів вимірювання QoE.

Зазначається, оптимізація QoE може бути виконана з використанням різних механізмів регулювання якості сприйняття, наприклад, у мобільних SDN мережах за рахунок використання оптимального розподілу мережного та радіоресурсів [195–197]. Також QoE оптимізація може бути реалізована шляхом проведення відповідних налаштувань серверів служб чи застосунків [198–200]. Застосування управління QoE-політиками в транспортних (магістральних) мережах описано в роботах [201, 202], оптимізоване рішення про передачу (хендовер) – [203–206], тоді як [207–209] присвячено QoE оптимізації енергоспоживання. Можна зробити висновок, що QoE оптимізація може бути виконана на різних рівнях, починаючи від каналного до рівня застосунків, або використовуючи системний оптимізаційний підхід із залученням різних рівнів взаємодії елементів телекомунікаційної мережі [210–213].

Важливе місце в архітектурі забезпечення заданого рівня QoS/QoE традиційно відводиться технологічним засобам (протоколам та механізмам) мережного рівня OSI. До цих рішень належать насамперед:

- методи маркування (пріоритизації) пакетів, які ґрунтуються на використанні полів IP-пріоритету та DSCP у байті типу обслуговування (ToS) у заголовку IP-пакета;

- алгоритми та механізми формування та обслуговування черг (FIFO, PQ, CQ, WFQ, CBWFQ, LLQ тощо), які реалізують функції розподілу каналного та буферного ресурсу на маршрутизаторах мережі; механізми обслуговування черг залежать від використаної архітектури комутації пакетів. Наприклад, зважений алгоритм WFQ є ідеальним рішенням для маршрутизаторів, побудованих на основі шинної архітектури. У маршрутизаторах, що застосовують для комутації пакетів спеціалізовану комутаційну матрицю, використовуються модифікований зважений алгоритм кругового обслуговування MWRR (Modified Weighted Round Robin) і модифікований

алгоритм кругового обслуговування з дефіцитом MDRR (Modified DRR);

- алгоритми та механізми активного управління чергами (RED, WRED, SPD, ECN, REM), які сумісно з протоколами транспортного рівня (наприклад TCP) реалізують функції боротьби з перевантаженням черг та мережі загалом шляхом превентивного обмеження їхньої довжини;

- алгоритми та механізми профілювання (вирівнювання та обмеження) трафіка, які за допомогою алгоритмів «кошика маркерів» або «драного відра» використовуються для контролю за рівнем навантаження, що надходить у мережу;

- протоколи резервування мережних ресурсів, наприклад RSVP та LDP, які реалізують функції щодо забезпечення гарантій QoS;

- моделі, методи, алгоритми та протоколи маршрутизації внутрішнього (RIP, IGRP/EIGRP, OSPF, IS-IS) та зовнішнього шлюзу (EGP/BGP), на які покладається розв'язання задач щодо визначення множини маршрутів та балансування навантаження між ними (Load-Balance Routing). До того ж протоколи RIP та OSPF виконують балансування навантаження за маршрутами з рівною метрикою (вартістю), а протокол EIGRP забезпечує балансування одночасно за 16 маршрутами, зокрема що мають різну метрику. Проте для виконання балансування навантаження за маршрутами з різною вартістю необхідно провести додаткові налаштування мережного обладнання, як правило, вручну [35].

### **1.3.3. Аналіз рішень щодо забезпечення якості обслуговування засобами маршрутизації в програмно-конфігурованих мережах**

Аналіз сучасних рішень показав [214–242], що ефективна доставка відеопотоків із покращеною якістю сприйняття QoE може бути досягнута в мережах SDN за допомогою, наприклад, використання найкоротших маршрутів багатошляховою маршрутизацією за множиною шляхів, що не перетинаються, у процесі застосування процедур багатоадресної IP маршрутизації тощо.

У табл. 1.2 узагальнено деякі стратегії управління послугами потокової передачі мультимедійного трафіка, основані на QoE. Порівняння цих підходів з точки зору «справедливості якості сприйняття» (QoE-fairness) для користувачів, складності розгортання та найбільш важливих показників мережної продуктивності дозволило зробити висновок щодо змін серед розроблюваних технологічних рішень у напрямку прийняття парадигм SDN та NFV для управління QoE та мережними ресурсами в мережах майбутнього (Future Networks) загалом.

Таблиця 1.2

**Стратегії управління послугами потокової передачі мультимедійного трафіка, основані на QoE, з використанням технологій SDN/NFV**

Джерело	Стратегія	Опис рішення
[214–220]	Серверна та мережна оптимізація	Максимізація QoE для кінцевих користувачів за допомогою розрахунку найкращого маршруту для кожного потоку мультимедійної послуги; обчислення оптимальної бітової швидкості для користувачів з метою отримання справедливого рівня QoE відеопотоків, що передаються; оптимізація QoE шляхом присвоєння різного пріоритету відеопотокам залежно від вимог щодо якості.
[226–232]	Механізми QoE-перемаршрутизації	Максимізація QoE для кінцевих користувачів за допомогою розрахунку найкращого маршруту для кожного потоку мультимедійної послуги. Отже, відео буде передаватися (трансляватися) шляхами з низькою затримкою та високою пропускну здатністю, що підвищить отримувану якість відео.

## Продовження таблиці 1.2

[30, 221–225]	Справедливий рівень (QoE-fairness) і персоналізоване управління QoE	Використання ефективного розподілу ресурсів мережі для забезпечення максимальної справедливості якості сприйняття між користувачами. Основна ідея полягає в тому, щоб уникнути нестабільності якості сприйняття, несправедливого розподілу пропускнуї здатності та, наприклад, недовикористання мережних ресурсів серед клієнтів-конкурентів DASH (Dynamic Adaptive Streaming over HTTP), що спільно використовують один і той самий канал зв'язку (вузьке місце).
[233–236]	Міжрівнева QoE оптимізація	Застосування міжрівневої взаємодії та координації для ефективного використання мережних ресурсів та оптимізації QoE кінцевих користувачів. У цьому разі вимоги до якості сприйняття можуть бути задані на рівні застосунків і керуватися на мережному рівні за допомогою SDN контролерів.
[237–239]	Оптимізація на транспортному рівні	Цей підхід застосовується для організації ефективної багатошляхової маршрутизації та підвищення швидкості передачі значних обсягів мультимедійних даних між кінцевими користувачами за умови гарантії QoE в програмно-конфігурованих мережах. Так, наприклад, у рішенні MPTCP забезпечується балансування навантаження, надійні комунікації та краще використання ресурсів мережі, що призводить до вищої пропускнуї здатності ТКМ і QoE користувачів.

Це також вказує на важливість зазначених передових технологій для підвищення продуктивності та надання послуг з високим рівнем якості сприйняття для кінцевих користувачів у сучасних і майбутніх телекомунікаційних мережах. Використання концепцій SDN/NFV та їхня значна підтримка в мережах майбутнього, таких як, наприклад, 5G, є основним напрямом перспективних досліджень [133–135]. Особливої уваги заслуговують рішення щодо забезпечення QoE разом із реалізацією концепції трафік інжиніринг (TE) гетерогенних транспортних мереж SDN, як це, наприклад, запропоновано в роботах [240, 241].

Через різноманітність мережних топологій та сервісів, які можуть бути розгорнуті в транспортній мережі, рішення щодо балансування навантаження, основані на концепції TE, реалізуються SDN контролером та мають враховувати поточну топологію мережі, наявні ресурси та рівень якості сприйняття кінцевого користувача.

У роботі [240] демонструється цілісний застосунок зворотного зв'язку щодо TE та якості сприйняття (QoE), побудований поверх реальної транспортної мережі SDN для неоднорідних оптичних, 5G та супутникових сервісів (рис. 1.6).

Ця програма зворотного зв'язку QoE розподілена між контролером SDN та клієнтськими машинами (користувачами) і, як показано в роботі, забезпечує покращення QoE кінцевих користувачів у сценаріях великих навантажень, які тестувалися для багатоадресних відеозастосунків SatIP. Запропоноване рішення [240] також може поєднувати потокові сервіси Інтернет та мобільні застосунки.

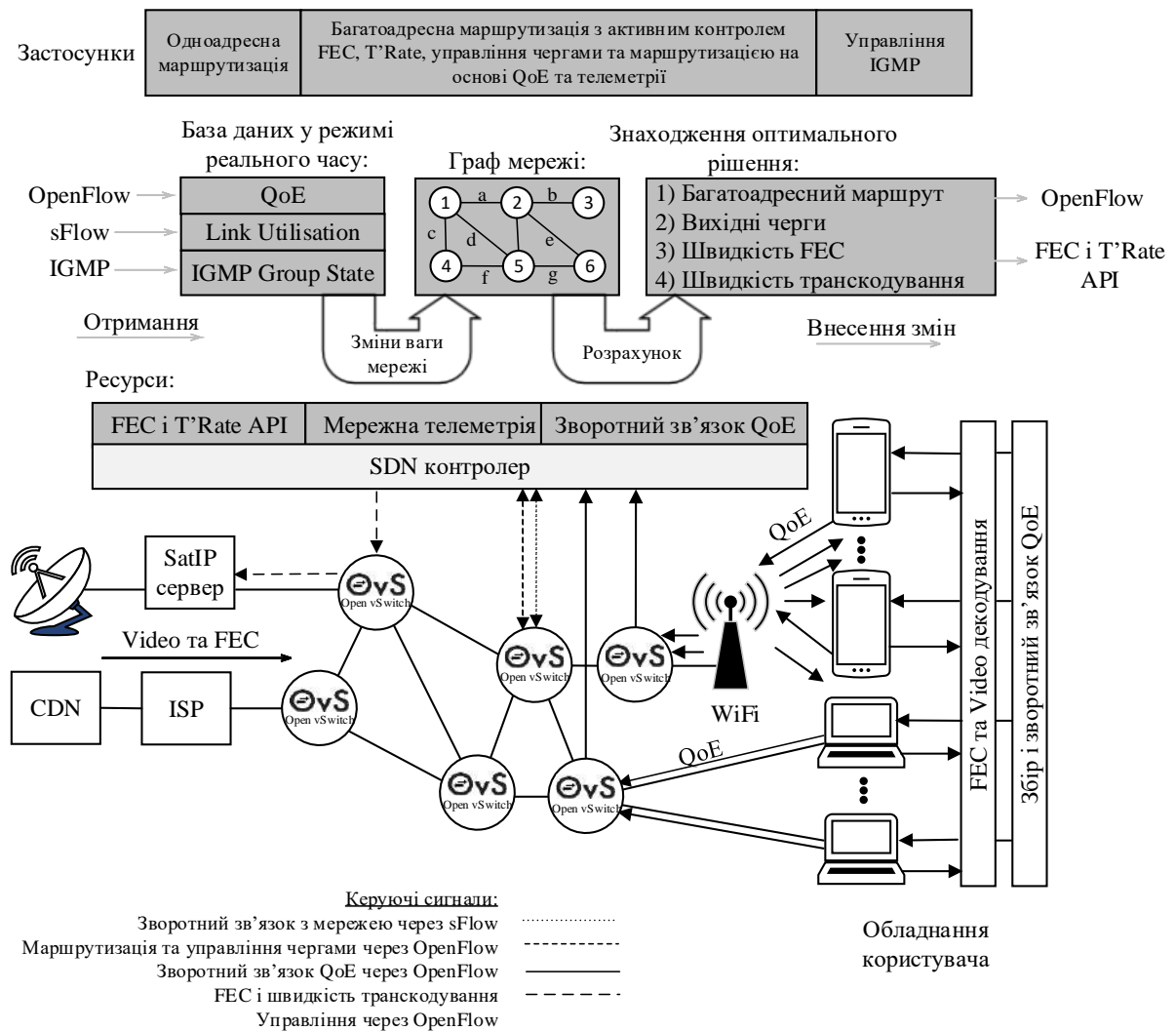


Рис. 1.6. Архітектура QoE-TE у SD-WAN [240]

Також варто відзначити застосування засобів штучного інтелекту, а саме методів машинного навчання [242–244], в управлінні рівнем QoE, визначенні та прогнозуванні показників QoE. Так, наприклад, у роботі [242] для покращення QoE представлено фреймворк для когнітивної мережі, орієнтованої на QoE, яка дозволяє впровадити моделі машинного навчання (Machine Learning, ML) в архітектурі SDN (рис. 1.7). Підхід ML передбачається використовувати для автономного навчання найкращої стратегії управління для певного застосунку та найкращого задоволення його вимог. Фреймворк базується на комбінованому підході SDN і ML, поєднуючи інформацію, отриману як із північного (North Bound Interface, NBI), так і з південного (South Bound Interface, SBI) інтерфейсів SDN для оцінки стану мережі та застосунка.



Далі модуль, вбудований на SDN контролері, використовує цю інформацію для співвіднесення метрик мережного рівня з умовами застосунку. Отже, модуль визначає, як особливості мережі впливають на стан застосунку, а потім ця інформація використовується для прийняття рішень щодо мережних ресурсів, необхідних тому чи іншому застосунку. Фреймворк має три основні модулі: збір та агрегування даних, навчання щодо мережі та застосунків, а також управління мережею з прогнозуванням.

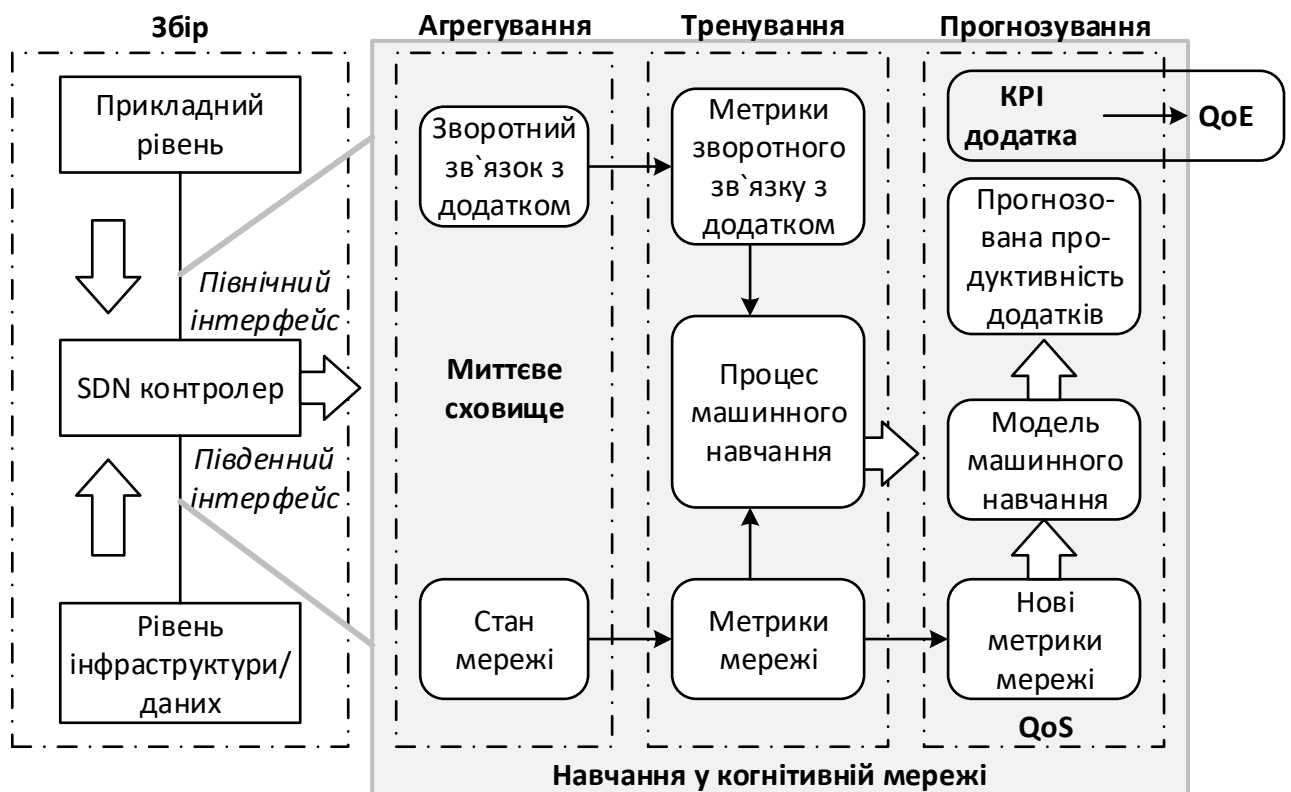


Рис. 1.7. Архітектура когнітивної програмно-конфігурованої мережі, орієнтованої на забезпечення QoE та основаної на машинному навчанні [242]

Варто зазначити, що запропонована в [242] архітектура призначена для дослідження типів каналів зв'язку та їхнього впливу на вибір міжкінцевого шляху для потоків застосунків у SDN. Це має важливе значення для мереж майбутнього (FN), що пов'язано головним чином з їхньою гетерогенністю та використанням мобільних мереж. Завдяки цьому різноманітні застосунки вимагатимуть для кожного потоку маршрути, що проходять через різні

типи каналів зв'язку (проводові, безпроводові, оптичні).

Унаслідок проведеного аналізу сучасних протоколів та технологій маршрутизації, які реалізуються в IP/MPLS та SDN мережах, встановлено, що забезпечення з їхньою допомогою міжкінцевої якості обслуговування може бути реалізоване на основі таких основних підходів [68]:

- на підставі використання маршрутних метрик каналів зв'язку, пов'язаних між собою QoS-показниками;
- на базі реалізації технології Traffic Engineering, яке орієнтоване на ефективне балансування навантаження в телекомунікаційній мережі;
- за рахунок реалізації багатошляхової маршрутизації із забезпеченням необхідних QoS-показників.

Аналізуючи наведені підходи, варто відзначити, що перший і другий орієнтовані тільки на поліпшення якості обслуговування в телекомунікаційній мережі загалом і не дають жодних гарантій щодо числових значень основних показників QoS. На відміну від перших двох підходів, третій спрямований саме на розрахунок маршрутів, уздовж яких гарантуються задані значення таких показників QoS, як швидкість передачі пакетів, середня міжкінцева затримка, імовірність втрат пакетів тощо.

Наведені підходи здебільшого визначають якість роботи мережі (Network Performance, NP). Однак на практиці забезпечення QoS визначається в сукупності якістю роботи мережі та якістю сприйняття послуги (Quality of Experience, QoE) на рівні користувача. До того ж саме надання необхідного рівня QoE має першорядне й важливе значення для оптимізації використання ресурсів провайдера/оператора послуг. Тому важливим є завдання щодо забезпечення саме заданих значень QoS/QoE-показників, основане на оптимізації процесів маршрутизації з управлінням значеннями показників мережної продуктивності (пропускнуою здатністю, середньою міжкінцевою затримкою та рівнем втрат пакетів).

#### **1.4. Класифікація засобів відмовостійкої маршрутизації в телекомунікаційних мережах**

Ґрунтуючись на результатах аналізу даних, висвітлених у роботах [1, 17–32, 150], можна навести класифікацію засобів відмовостійкої маршрутизації в ТКМ за такими основними критеріями (рис. 1.8):

- за рівнем забезпечення резервування (захисту) елементів мережі;
- за типом підтримуваної схеми захисту;
- за місцем реалізації відмовостійкої маршрутизації в мережі;
- за типом використовуваної схеми резервування;
- за підтримкою захисту рівня QoS;
- за підтримкою захисту рівня QoE.

Ефективним проактивним засобом забезпечення відмовостійкості ТКМ є реалізація багатошляхової маршрутизації, коли в разі відмови одного з шляхів інші маршрути зможуть підтримувати надання мережного сервісу, хоча і з нижчим рівнем QoS. Тому в такому випадку для забезпечення максимальної надійності бажано використовувати шляхи, що не перетинаються.

Реактивне забезпечення відмовостійкості ТКМ засобами маршрутизації ґрунтується на тому, що здійснюється розрахунок як множини основних, так і множини резервних шляхів. У цьому разі реакція мережі на відмови буде більш оперативною, бо практично в реальному часі (десятки мілісекунд) здійсниться перемикання потоків пакетів з основного маршруту на попередньо розрахований резервний шлях. До того ж можуть реалізуватися схеми локального захисту структурних елементів мережі (вузла та каналу), сегментного та глобального захисту (множини мережних елементів або маршруту) [2, 150, 189].

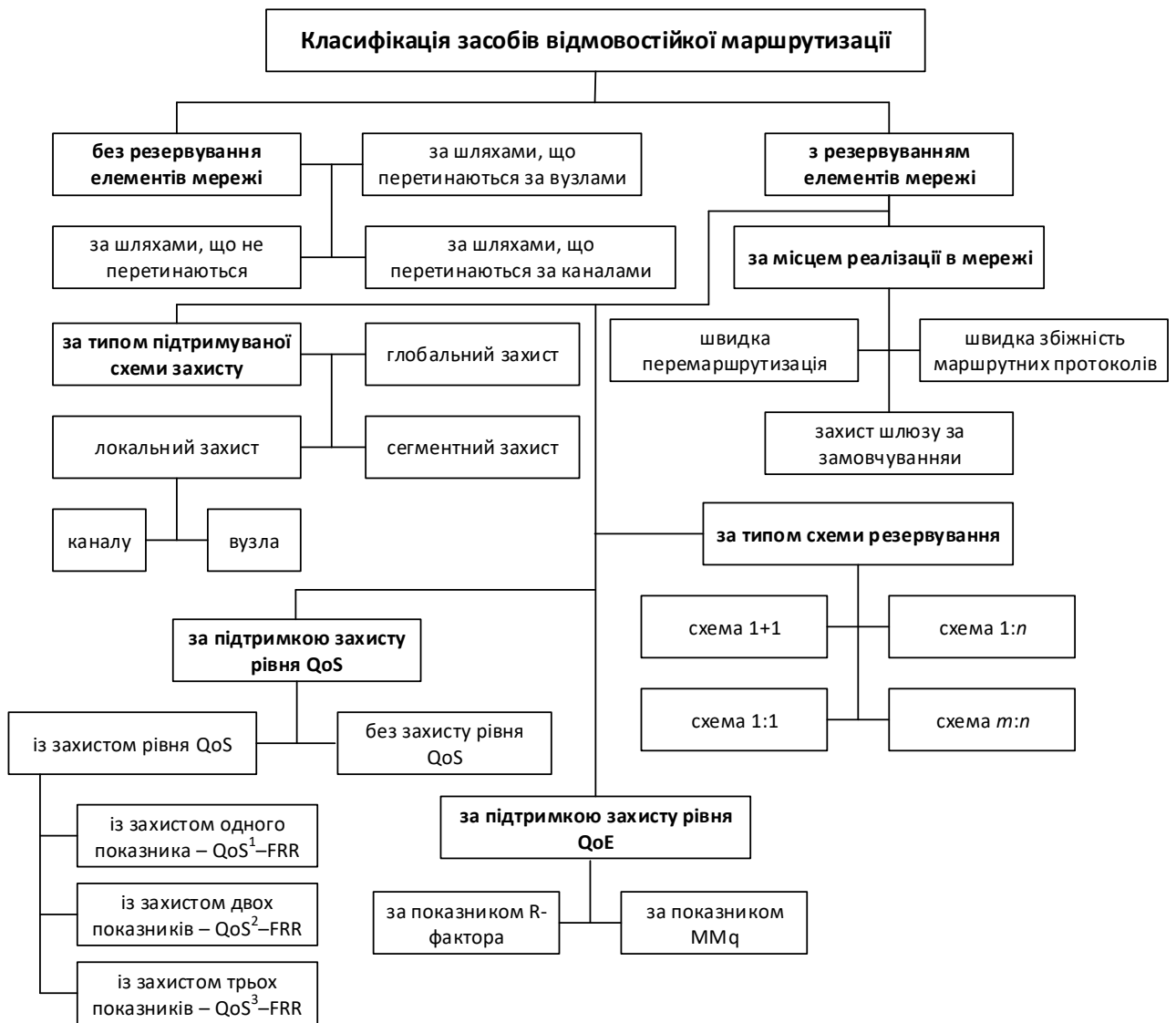


Рис. 1.8. Класифікація засобів відмовостійкої маршрутизації

У разі використання схеми захисту (резервування) каналу зв'язку ТКМ резервний маршрут не повинен містити проблемний канал, який може відмовити (рис. 1.9). Тобто, коли такий канал виходить з ладу, починає застосовуватися резервний маршрут, локалізуючи відмову на час перерозрахунку множини нових основних маршрутів. Необхідне створення резервного маршруту в обхід цього каналу.

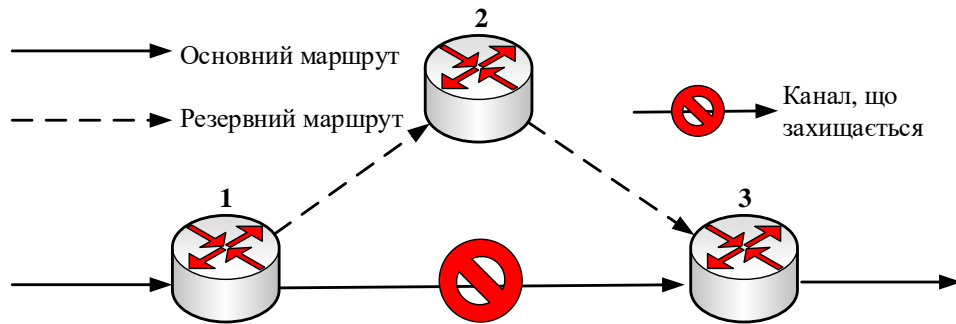


Рис. 1.9. Схема захисту каналу зв'язку ТКМ

Схема захисту (резервування) вузла застосовується, якщо може відмовити не окремий канал, а цілий вузол (маршрутизатор) мережі. Тоді під час відмовостійкої маршрутизації його також варто виключити із резервного маршруту, на який будуть перемикатися потоки пакетів, що передаються в ТКМ (рис. 1.10).

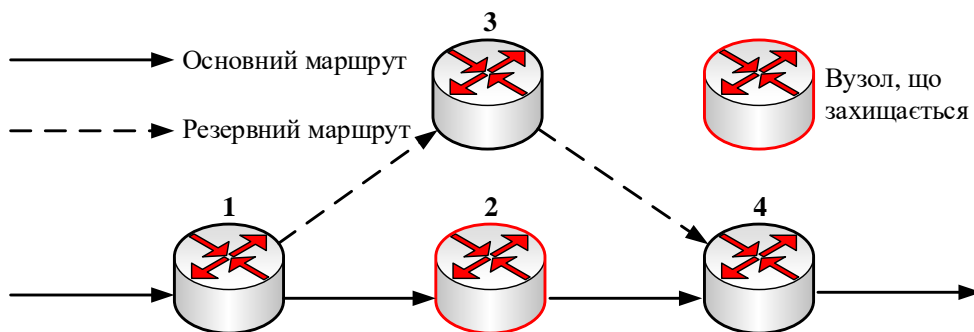


Рис. 1.10. Схема захисту вузла ТКМ

Найбільш складною для реалізації є схема захисту (резервування) шляху, коли основний і резервний маршрути мають спільні лише вузли відправника та отримувача пакетів. У разі відмови основного маршруту потоки також будуть передаватися за заздалегідь розрахованим резервним шляхом (рис. 1.11).

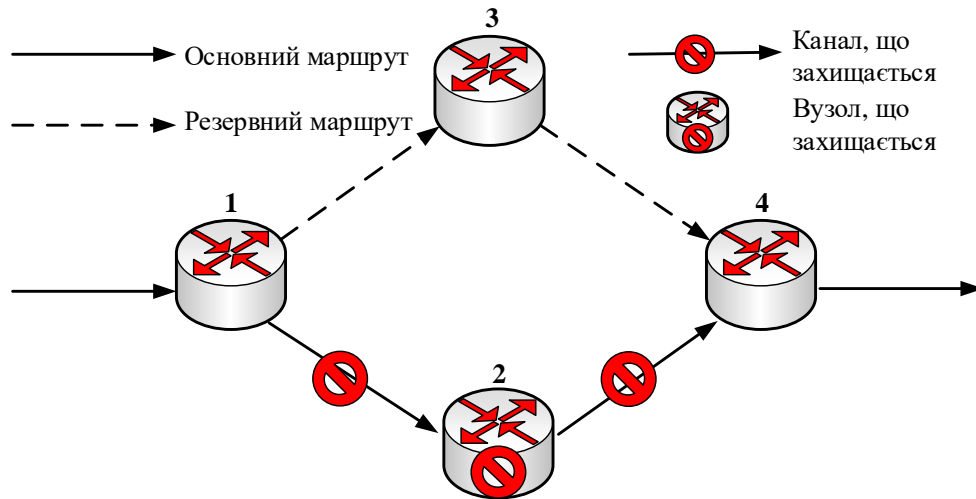


Рис. 1.11. Схема захисту шляху ТКМ

Які саме елементи мережі схильні до відмов та з якою інтенсивністю, визначає система управління мережею, яка веде статистику щодо зміни стану мережі, здійснює аналіз впливу внутрішніх та зовнішніх чинників, а також оцінює загальний рівень надійності ТКМ.

Крім того, варто зазначити, що пов'язані з відмовостійкістю протокольні рішення маршрутизації можуть підтримувати такі схеми резервування залежно від вимог до відмовостійкості [2, 150]:

- 1+1, коли потік даних одночасно передається як за основним, так і за резервним маршрутом;
- 1:1, якщо для кожного основного маршруту створюється резервний шлях, яким будуть передаватися пакети у випадку відмови основного шляху;
- $n:1$ , коли для  $n$  основних маршрутів створюється один резервний (схема facility backup);
- $1:n$ , якщо для одного основного маршруту створюється  $n$  резервних;
- $n:m$  – це найбільш загальний випадок, коли для  $n$  основних маршрутів створюється  $m$  резервних.

За місцем реалізації в мережі засоби відмовостійкої маршрутизації поділяються на протоколи, які реалізуються на границі мережі, та рішення, що використовуються всередині транспортної мережі. У випадку використання в ТКМ технологій IP/MPLS на границі мережі використовуються протоколи захисту шлюзу за замовчуванням [150], такі як:

- GLBP (Gateway Load Balancing Protocol);
- HSRP (Hot Standby Router Protocol);
- VRRP (Virtual Router Redundancy Protocol).

Основним завданням цих протоколів є реалізація схеми захисту приграничного вузла, тобто шлюзу за замовчуванням. Це здійснюється шляхом організації віртуального шлюзу, який би містив множину інтерфейсів декількох приграничних маршрутизаторів. Отже, локальні мережі та/або мережі доступу будуть мати підключення до транспортної мережі через декілька точок, тобто зможуть запобігти блокуванню у випадку виходу з ладу або перевантаження основного приграничного маршрутизатора (шлюзу за замовчуванням).

До рішень з відмовостійкої маршрутизації, які реалізуються всередині транспортної мережі, належать:

- швидка протокольна збіжність (Fast IGP/BGP Convergence);
- швидка перемаршрутизація (Fast ReRoute, FRR).

У процесі використання рішень першої групи швидка протокольна збіжність, як правило, досягається шляхом налаштування керуючих таймерів у маршрутних протоколах. Особливо це стосується протоколів дистанційно-векторної маршрутизації (RIP, IGRP), у яких маршрутні таблиці перерозраховуються періодично. За замовчуванням період їхнього оновлення становить десятки секунд або навіть хвилини, тому зменшуючи таймер (період) оновлення до одиниць секунд, можна значно зменшити час реакції протоколу на можливі відмови. Однак у цьому випадку значно зростає обсяг службового трафіка, що містить інформацію про стан мережі та маршрутні таблиці, якими обмінюються маршрутизатори.

Протоколи швидкої перемаршрутизації (FRR) забезпечують реактивну відмовостійку маршрутизацію основними та резервними шляхами із реалізацією схем захисту, які наведені на рис. 1.9–1.11. Проте захист структурних елементів є необхідною, але далеко не достатньою умовою забезпечення ефективного функціонування ТКМ. Актуальним завданням є забезпечення паралельно із захистом каналу/вузла/маршруту також захисту заданого рівня QoS. Тобто QoS-вимоги мають виконуватись як уздовж основного маршруту, так і вздовж резервного.

Перші кроки в цьому напрямі стосуються реалізації схеми захисту пропускної здатності мережі як основного показника QoS [2, 20, 60, 66, 245–252]. У цьому випадку і основний, і резервний маршрути матимуть необхідну пропускну здатність, значення якої резервується. Однак мультисервісність сучасних ТКМ, у якій передаються пакети різних мережних застосунків, вимагає захисту рівня QoS за множиною показників [57, 69, 78]. Залежно від чутливості мережних застосунків до значень того чи іншого QoS-показника (табл. 1.3) захищатися має відповідна їхня комбінація.

Таблиця 1.3

### Чутливість трафіка різних застосунків до значень QoS-показників

Додаток	Надійність	Середня затримка	Джитер	Пропускна здатність
Електронна пошта	висока	низька	низька	низька
Передача файлів	висока	низька	низька	середня
Web-доступ	висока	середня	низька	середня
Аудіо за вимогою	низька	низька	низька	середня
Відео за вимогою	низька	низька	висока	висока
Телефонія	низька	висока	висока	низька
Відеоконференція	низька	висока	висока	висока



Якщо захищається рівень якості обслуговування, який сприймається кінцевим користувачем, то аналізу підлягають QoE-показники. Так, у процесі маршрутизації потоків VoIP уздовж основного та резервного маршрутів має забезпечуватися виконання вимог щодо значень R-фактора [176]. В умовах відмовостійкої маршрутизації мультимедійних потоків [176] необхідно забезпечити захист QoE-показника мультимедійної якості (*MMq*). Вирішення подібних маршрутних завдань потребує більш повної інформації як про стан мережі, так і про характеристики аудіо- та відеопотоків пакетів.

## **1.5. Аналіз механізмів відновлення після збоїв у ТКМ**

### **1.5.1. Аналіз механізмів відновлення після збоїв у технології MPLS**

Архітектура багатопроTOCOLЬНОЇ комутації за мітками (Multiprotocol Label Switching, MPLS) [253], що базується на використанні маршрутизаторів, які комутують пакети за мітками (Label Switching Routers LSR) та здатні їх пересилати за відповідними маршрутами (Label Switched Path, LSP) на основі додаткових міток, що містяться в заголовку пакета. Оскільки технологія MPLS мала багато переваг і була визнана перспективним рішенням, незабаром її було розширено для підтримки таких важливих функцій, як трафік інжиніринг [254] (подальший розвиток у міждоменному контексті в [255]) та механізми швидкої перемаршрутизації (Fast ReRoute) для захисту тунелів LSP [256]. Зокрема, розширення Fast ReRoute дозволило локальне відновлення тунелів LSP за десятки мілісекунд на основі встановлених резервних тунелів LSP.

### **1.5.2. Рішення щодо швидкої перемаршрутизації в IP мережах**

Коли в процесі маршрутизації в IP мережі відбувається відмова каналу зв'язку або вузла, неминуче настає період порушення доставки трафіка, поки не завершиться конвергенція мережі за новою топологією.

**Прийняті стандарти щодо швидкої перемаршрутизації MPLS FRR**

Пос.	Стандарт	Назва/Опис
[256]	RFC 4090	Розширення щодо швидкої перемаршрутизації до RSVP-TE для тунелів LSP
[257]	RFC 4428	Аналіз механізмів відновлення на основі узагальненої багатопротокольної комутації за мітками (Generalized Multi-Protocol Label Switching, GMPLS) (зокрема захист і відновлення)
[255]	RFC 5151	Міждоменний MPLS і GMPLS трафік інжиніринг – розширення щодо протоколу резервування ресурсів – трафік інжиніринг (Resource Reservation Protocol-Traffic Engineering, RSVP-TE)
[258]	RFC 6372	Концепція живучості транспортного профілю MPLS (MPLS Transport Profile, MPLSTP)
[259]	RFC 6445	Мультипротокольна комутація за мітками (MPLS), інформаційна база управління трафік інжинірингом для швидкої перемаршрутизації
[260]	RFC 6981	Фреймворк для IP і MPLS швидкої перемаршрутизації з використанням not-via addresses
[261]	RFC 8271	Оновлення протоколу резервування ресурсів для швидкої перемаршрутизації та трафік інжинірингу GMPLS (LSPs)

У цьому разі пакети для тих вузлів-отримувачів, до яких раніше маршрут передавання проходив через елемент мережі, що відмовив, можуть бути втрачені або зациклені [262–264]. Відновлення після таких відмов може зайняти кілька секунд, а в деяких випадках навіть хвилин через розподілений характер площини управління IP мережі [265, 266].

У типовій конфігурації площини управління IP мережі один або декілька внутрішньодомених протоколів маршрутизації внутрішнього шлюзу на основі

використання найкоротшого шляху (Interior Gateway Protocols, IGP), такі як OSPF (Open Shortest Path First [267]) або IS-IS (Intermediate System-to-Intermediate System [268]), та міждоменний протокол зовнішнього шлюзу (Exterior Gateway Protocol, EGP), що базується на політиці міждоменних векторів шляху (EGP), подібно до протоколу приграничних шлюзів (Border Gateway Protocol, BGP [269]), взаємодіють складними способами для того, щоб маршрутизатори сходилися по стабільних маршрутах [265, 266]. Багато Інтернет-застосунків (мультимедіа, VPN) не були сконструйовані з можливістю функціонувати за умови таких тривалих відмов.

Отже, IPFRR [270] – це механізм, що забезпечує швидке зменшення часу реакції на відмови в площині передачі даних у процесі внутрішньодоменої одноадресної маршрутизації (табл. 1.5).

Таблиця 1.5

#### Прийняті стандарти щодо швидкої перемаршрутизації в IP мережах

Пос.	Стандарт	Назва/Опис
[270]	RFC 5714	Фреймворк швидкої перемаршрутизації в IP мережах (IP Fast ReRoute Framework)
[262]	RFC 5715	Фреймворк для конвергенції без циклів (A framework for loop-free convergence)
[260]	RFC 6981	Фреймворк швидкої перемаршрутизації для IP та MPLS у процесі використання концепції «не-через адреси» (not-via addresses)
[271]	RFC 7490	Швидка перемаршрутизація в умовах використання віддалених альтернативних маршрутів без циклів (Remote Loop-Free Alternate (LFA) Fast Reroute)
[272]	RFC 7812	Архітектура швидкої перемаршрутизації IP/LDP у процесі використання максимально надлишкових дерев (Maximally Redundant Trees Fast ReRoute, MRT-FRR)

### **1.5.3. Рішення щодо міждоменної швидкої перемаршрутизації**

Реалізація FRR у процесі міждоменної маршрутизації, тобто коли окремими доменами мережі керують незалежні елементи (наприклад, контролери доменів), передбачає вирішення додаткового набору завдань порівняно з внутрішньодоменною швидкою перемаршрутизацією.

Протокол приграничного шлюзу BGP – це протокол міждоменної маршрутизації де-факто, який диктує, як частини мережі, що називаються автономними системами (Autonomous System, AS), повинні обмінюватися інформацією в процесі маршрутизації для встановлення зв'язності маршрутів [269]. Очевидно, що оскільки мережі не мають контролю та/або видимості в окремих доменах мережі, запропоновані методи FRR часто досягають значно меншої стійкості до відмов, ніж внутрішньодоменні механізми. Більше того, міждоменний FRR часто потребує певної координації між доменами, щоб гарантувати зв'язність міждоменних маршрутів, що було перешкодою для більшості запропонованих схем, не даючи їм стандартизуватися.

Зазначимо, що значна кількість технологічних викликів усе ще потребують вирішення, незважаючи на десятиліття академічних і промислових зусиль, спрямованих на підвищення відмовостійкості BGP [189, 269]. Навіть підтримка резервних шляхів у BGP видається нетривіальним завданням через необхідність збереження сумісності із попередніми версіями традиційно використовуваних технологій, конфіденційності та обсягу інформації про маршрутизацію, що циркулює на цей час в Інтернеті для обслуговування сотень тисяч мереж і майже мільйона IP префіксів.

### **1.5.4. Рішення щодо відновлення після відмов у програмно-конфігурованих мережах**

Розглянемо вдосконалені механізми швидкої перемаршрутизації, які з'явилися з поширенням програмно-конфігурованих мереж [279–293].

Таблиця 1.6

**Рішення щодо швидкої перемаршрутизації BGP**

Пос.	Опис рішення
[265]	Досягнення відновлення передавання даних за час, менший ніж 50 мс, після відмов однорангових каналів BGP
[273]	Обмеження пошуку шляху в BGP
[274]	R-BGP: рішення щодо уникнення незв'язності під час BGP конвергенції
[275]	LOUP: Принципи та практика поширення внутрішньодомених маршрутів
[276]	Конвергенція, незалежна від префіксів BGP (Prefix Independent Convergence, PIC)
[277]	SWIFT: Прогнозована швидка перемаршрутизація
[278]	Blink: Швидке відновлення повної зв'язності в площині даних

У SDN контроль над мережними пристроями (наприклад, комутаторами OpenFlow) передається та консолідується на логічно централізованому контролері (пулі контролерів). Це відокремлення площини управління від площини даних дозволяє розвивати та впроваджувати першу незалежно від обмежень та життєвих циклів другої. Однак це також створює нові технологічні виклики. Якщо відбувається відмова каналу зв'язку, її потрібно не тільки виявити, а й повідомити про цей інцидент контролеру мережі, який потім переконфігурує вражені маршрути. Такі непрямі взаємодії не лише призводять до затримок, але, якщо має місце внутрішньосмугова сигналізація, елементи мережі та контролер можуть навіть бути відключені через відмову каналу.

Так, наприклад, час реакції контролера становить приблизно 100 мс [279]. Оскільки час відновлення також залежить від кількості потоків, що підлягають відновленню, довжини маршруту, сплесків трафіка в мережі, що управляється контролером, і, таким чином, може зайняти навіть більше часу для великих мереж. Проте відновлення після відмови у функціонуванні елемента площини даних може бути ефективно реалізоване в контексті SDN. Локальна швидка

перемаршрутизація (Local Fast ReRoute) дозволяє комутатору SDN (або «точці локального відновлення») виявити несправність та перенаправити вражений трафік іншим маршрутом для досягнення вузла-отримувача (табл. 1.7).

Таблиця 1.7

### Рішення щодо швидкої перемаршрутизації в SDN

Пос.	Опис рішення
[280]	Специфікація комутаторів OpenFlow 1.1.0 (Fast-Failover Groups)
[281]	Масштабоване управління відмовами для OpenFlow
[282]	Забезпечення зв'язності через механізми площини даних
[283]	Slickflow: відмовостійка маршрутизація від джерела а мережах центрів оброблення даних із використанням OpenFlow
[284]	Plinko: Побудова відмовостійких таблиць маршрутизації
[285]	P4: Програмування незалежних від протоколу пакетних процесорів
[286]	Зв'язність площини даних із локальним швидким відновленням: графові алгоритми OpenFlow
[287]	Швидке відновлення в програмно-конфігурованих мережах
[288]	LFA з виявленням циклів для швидкої перемаршрутизації у програмно-конфігурованих мережах та мережах центрів оброблення даних
[289]	SPIDER: Відмовостійкий SDN канал із гарантованим часом відновлення
[290]	Масштабоване швидке відновлення від множинних відмов за допомогою стиснення таблиць маршрутизації
[291]	Виключення деревовидних структур L2
[292]	Ефективний захист площини даних для SDN
[293]	Підтримка нових застосунків із забезпеченням відмовостійкості з низькою затримкою в P4

## 1.6. Особливості застосування відмовостійкої маршрутизації в SDN

Як відомо, у програмно-конфігурованих мережах здійснюється розподіл площини даних і площини управління. У цьому випадку, якщо певний елемент мережі (канал, вузол, сегмент або цілий маршрут) виходить з ладу, він повинен бути, по-перше, виявлений, а по-друге, контролер має вжити певних кроків для швидкого відновлення передачі вражених потоків даних [17, 80, 292].

Кількість і тип таких збоїв, а також необхідність переконфігурації та розрахунків перемаршрутизації збільшує навантаження на контролери мережі. Наявні механізми FRR для мереж IP/MPLS можна перенести на SDN-мережі, але в цьому випадку варто враховувати обмеження таблиць маршрутизації OpenFlow комутатора та складність реалізації FRR [17, 292]. Аналіз наявних рішень показав актуальність розроблення підходів до швидкої перемаршрутизації у напрямку впровадження технології MPLS у SDN (табл. 1.8). Загалом сучасні підходи до використання механізмів швидкої перемаршрутизації в SDN під час реалізації різних схем захисту елементів мережі, як класичних (каналів зв'язку, вузлів тощо), так і специфічних схем для цього типу мереж, можна поділити на евристичні, графові та потокові [292, 294–302]. Більш детальний опис проаналізованих рішень представлено в табл. 1.8.

Виходячи з проведеного аналізу (табл. 1.8), можна зробити висновок, що найпоширенішими методами розв'язання задач FRR є евристичні підходи, тоді як серед схем підвищення відмовостійкості все ще переважає локальний захист (захист каналу зв'язку, вузла або контролера SDN-мережі). Однак відомо, що підходи, які базуються на поточкових моделях, як правило, основані на оптимізаційній постановці задач перемаршрутизації, насамперед спрямованих на ефективність використання доступних мережних ресурсів, є на сьогодні найбільш перспективними [300–302].

### Наявні рішення MPLS SDN FRR

Пос.	Опис рішення	Схема захисту	Технологія
[294]	<p>Запропоновано механізм відновлення для перемаршрутизації потоків у разі відмов каналів зв'язку для багатоканальних програмно-конфігурованих безпроводових mesh-мереж (Software-Defined Wireless Mesh Networks, SD-WMN), де час відновлення та пропускна здатність каналів зв'язку є ключовими показниками для оцінки ефективності сценаріїв відновлення після відмов.</p> <p>Тип рішення: евристичне.</p> <p>Переваги: зменшення часу відновлення порівняно зі звичайними протоколами маршрутизації за умови найкращої досяжної пропускної здатності.</p>	Захист каналу зв'язку	SD-WMN
[292]	<p>Запропоновано рішення для локального швидкого відновлення в SDN без утручання контролера у випадку відмови одного вузла або каналу зв'язку, якщо це топологічно можливо. Показано можливість використання (віддалених) альтернативних маршрутів без циклу ((remote) loop-free alternates, (r) LFA) для швидкої перемаршрутизації в SDN.</p> <p>Тип рішення: евристичне.</p> <p>Переваги: максимізація покриття, мінімізація обчислювальної складності, виявлення та уникнення циклів.</p>	Захист каналу зв'язку та вузла	SDN, LFA
[295]	<p>Представлено механізм максимально надлишкових дерев для обраного отримувача (destination-specific Maximally Redundant Trees, dMRT) для використання швидкої перемаршрутизації (FRR) у SDN і Hybrid SDN.</p> <p>Тип рішення: евристичне.</p> <p>Переваги: менше службове навантаження в SDN, короткий резервний шлях, висока масштабованість.</p>	Захист каналу зв'язку та вузла	MPLS FRR, SDN, Hybrid SDN MRT



## Продовження таблиці 1.8

[296]	<p>Запропоновано схему швидкого відновлення після відмов у SDN за концепцією мультиконтролера, де головний контролер відповідає за управління мережею в нормальному стані, тоді як інші контролери є резервними контролерами для управління мережею в стані відмови. Для розрахунку шляхів управління та планування шляхів, що не перетинаються, пропонується використання алгоритму К-найкращих шляхів (K-best path).</p> <p>Тип рішення: евристичне.</p> <p>Переваги: час відновлення – менше ніж 50 мс, механізми можуть бути використані для відновлення після відмов як шляхів управління, так і шляхів передачі даних.</p>	Захист контролера, каналу зв'язку та вузла	SDN, Multi-controller, In-band controlled OpenFlow Networks
[297]	<p>Запропоновано проактивні схеми відновлення в SDN після локальних збоїв на основі агрегування потоків трафіка із зменшенням участі контролерів у цьому процесі з метою зниження вимог до обчислювальної потужності контролера та обсягу генерованого керуючого трафіка під час процесу відновлення.</p> <p>Тип рішення: евристичне.</p> <p>Переваги: зменшено час відновлення та обсяг керуючого трафіка для відновлення, низькі вимоги до пам'яті комутаційних компонентів.</p>	Захист каналу зв'язку та вузла	SDN, Fast-Failover (FF)
[298]	<p>Запропоновано алгоритм локальної швидкої перемаршрутизації (Local Fast Reroute, LFR) у SDN, де відповідно до стратегії агрегування потоку LFR забезпечує швидке відновлення за рахунок зменшення кількості поточкових операцій між SDN контролером і комутаторами.</p> <p>Тип рішення: евристичне.</p> <p>Переваги: зменшено час відновлення після відмови, мінімізовано загальну кількість потоків у мережі.</p>	Захист каналу зв'язку	SDN, Local Fast Reroute

## Продовження таблиці 1.8

[299]	<p>Запропоновано механізм оновлення таблиць маршрутизації та перемаршрутизації у випадку відмов каналів зв'язку в SDN за умови забезпечення прийнятного рівня якості обслуговування (QoS).</p> <p>Тип рішення: графова модель.</p> <p>Переваги: покращення якості обслуговування за рахунок зменшення затримок маршрутизації пакетів і втрат даних у разі виявленої відмови каналу.</p>	Захист каналу зв'язку	SDN, IPFRR, QoS
[300]	<p>У статті пропонується рішення Hybrid-Ніе для швидкої перемаршрутизації, що дозволяє визначити співвідношення розподілу переданих потоків у резервних шляхах відповідно до їхнього прогнозованого використання.</p> <p>Тип рішення: потокова модель, оптимізаційна постановка задачі.</p> <p>Переваги: ефективне відновлення в разі виходу з ладу міждомених каналів зв'язку, балансування навантаження та гнучкість для розрахунку шляху відновлення.</p>	Захист каналу та множини каналів зв'язку	Hybrid SDN, SD-WAN, трафік інжиніринг (TE), внутрішньодомenna та міждомenna маршрутизація
[301]	<p>Розроблено ефективне рішення щодо оптимального відновлення з використанням сегментної маршрутизації в SDN.</p> <p>Тип рішення: потокова модель, оптимізаційна постановка задачі.</p> <p>Переваги: значні переваги щодо використання мережного ресурсу завдяки оптимальному відновленню із сегментною маршрутизацією.</p>	Захист каналу зв'язку та вузла, спільне локальне відновлення (Shared Local Restoration)	SDN, сегментна маршрутизація
[302]	<p>Запропоновано багатокритеріальний алгоритм максимального потоку з двома критеріями за мінімальних витрат для забезпечення збалансованого та відмовостійкого підходу в MPLS/SDN мережі.</p> <p>Тип рішення: оптимізаційна постановка задачі.</p> <p>Переваги: зменшено складність маршрутизації та час обчислення маршруту, збалансоване використання мережних ресурсів, зменшення часу відновлення.</p>	Захист каналу зв'язку та вузла	MPLS/SDN, Traffic Engineering, QoS

Продовження таблиці 1.8

[250]	<p>Запропоновано дворівневий метод одношляхової швидкої перемаршрутизації з балансуванням навантаження відповідно до концепції TE в SDN під час реалізації схем захисту каналу, вузла, шляху та пропускної здатності.</p> <p>Тип рішення: потокова модель, оптимізаційна постановка задачі.</p> <p>Переваги: знижено обчислювальну складність за рахунок лінійності методу та удвічі меншої розмірності задачі, захист пропускної здатності вздовж резервного маршруту.</p>		<p>SDN, FRR, балансування навантаження</p>
-------	---	--	--

Варто наголосити на недоліках щодо рішень під час реалізації MPLS SDN FRR. Зокрема виконання схеми захисту шляху із схемою надмірності  $1:n$  зазвичай призводить до збільшення в  $n$  разів розмірності задачі оптимізації під час розрахунку маршрутів [250, 303–305].

Якщо пропонується рішення для багатошляхової FRR, виникає необхідність у формулюванні та розв'язанні нелінійної задачі оптимізації [303]. Ці фактори мають дуже критичний вплив на обчислювальну складність і масштабованість рішень маршрутизації, які повинні виконуватися централізовано контролером SDN.

### **1.7. Перспективи розвитку методів відмовостійкої маршрутизації щодо реалізації схем захисту рівня якості обслуговування в ТКМ**

Аналіз, проведений у попередніх підрозділах, засвідчив необхідність значного розширення функціоналу засобів (моделей, методів та протоколів) відмовостійкої маршрутизації в сучасних мультисервісних ТКМ у напрямі забезпечення захисту рівня якості обслуговування рівня QoS/QoE особливо в процесі передачі мультимедійного трафіка, чутливого до затримок та втрат пакетів. Тобто під час резервування структурних елементів мережі, а саме

каналів, вузлів та шляхів, потрібно, щоб уздовж і основного, і резервного маршрутів виконувалися вимоги щодо рівня якості обслуговування.

Варто зазначити, що в обслуговуванні пакетів більшості сучасних мережних застосунків необхідно забезпечити заданий рівень QoS за *множиною* показників. Це може стосуватися, наприклад, показників мережної продуктивності – пропускної здатності, часових показників (середньої міжкінцевої затримки та джитеру пакетів), а також показників надійності (імовірності втрат пакетів). Так, наприклад, потоки пакетів мультимедійних додатків однаково чутливі й до пропускної здатності, що виділяється, і до рівня затримок пакетів тощо (табл. 1.9) [150, 165]. Трафік даних потребує визначеного рівня як пропускної здатності, так і мінімальних втрат пакетів.

Дуже перспективним напрямом удосконалення засобів відмовостійкої маршрутизації також є захист рівня QoS за показниками якості обслуговування, яка сприймається кінцевим користувачем [69]. До того ж варто звернути увагу на те, що показники QoE є функцією від параметрів стану мережі та трафіка, які оцінюються практично на всіх рівнях OSI, що призведе до ускладнення рішень щодо відмовостійкої маршрутизації.

Це обумовлено як розширенням переліку мережних параметрів, збір та оброблення яких треба забезпечити в ТКМ, так і підвищенням вимог до обчислювальної потужності маршрутизаторів в IP/MPLS-мережах або контролерів (серверів) маршрутів у SDN. Тому і в розв'язанні задач відмовостійкої маршрутизації треба забезпечити залежно від типу трафіка та мережі диференційний захист не одного, а одночасно множини показників якості обслуговування як уздовж основного, так і резервного маршрутів.

Ґрунтуючись на результатах проведеного аналізу, проведена класифікація перспективних схем захисту рівня якості обслуговування в телекомунікаційних мережах (табл. 1.10). Так, до першого типу QoS<sup>1</sup>-FRR належать рішення щодо швидкої перемаршрутизації із захистом одного показника мережної продуктивності (Network Performance, NP).

Таблиця 1.9

## Гранично допустимі значення основних QoS-показників в IP мережах

Класи QoS	Тип додатку	Показник QoS				
		IPTD	IPDV	IPLR	IPER	IPRR
Клас 0	Додатки реального часу, чутливі до джитеру, з високою взаємодією (VoIP)	100 мс	50 мс	$10^{-3}$	$10^{-4}$	<i>H</i>
Клас 1	Додатки реального часу, чутливі до джитеру, інтерактивні (VoIP)	400 мс	50 мс	$10^{-3}$	$10^{-4}$	<i>H</i>
Клас 2	Дані транзакцій, високо інтерактивні додатки (сигналізація)	100 мс	<i>H</i>	$10^{-3}$	$10^{-4}$	<i>H</i>
Клас 3	Дані транзакцій, інтерактивні додатки	400 мс	<i>H</i>	$10^{-3}$	$10^{-4}$	<i>H</i>
Клас 4	Додатки з низькими втратами (короткі транзакції, великі за обсягом дані, потокове відео)	1 с	<i>H</i>	$10^{-3}$	$10^{-4}$	<i>H</i>
Клас 5	Традиційні додатки типових IP мереж	<i>H</i>	<i>H</i>	<i>H</i>	<i>H</i>	<i>H</i>
Клас 6	–	100 мс	50 мс	$10^{-5}$	$10^{-6}$	$10^{-6}$
Клас 7	–	400 мс	50 мс	$10^{-5}$	$10^{-6}$	$10^{-6}$

IPTD – затримка передачі IP-пакета, яка містить затримки поширення та оброблення в черзі; IPDV – міжкінцева варіація затримки (джитер); IPLR – допустима ймовірність втрат IP-пакетів; IPER – допустима ймовірність прийому пакетів з помилками; IPRR – допустима ймовірність зміни порядку надходження IP-пакетів; *H* – параметр не визначено.

Найбільш поширеним варіантом цього рішення є схема забезпечення захисту, наприклад, пропускної здатності ТКМ – QoS<sup>1</sup>-FRR-B [2, 20, 60, 66, 245–252], оскільки саме вона є ключовим і одним із найважливіших показників якості обслуговування.

Таблиця 1.10

### Схеми захисту рівня якості обслуговування в телекомунікаційних мережах

Тип схеми	Показники мережної продуктивності (Network Performance)			Quality of Experience, QoE	
	пропускна здатність (bandwidth, B)	середня затримка (delay, D)	імовірність втрат пакетів (loss, L)	R	MMq
QoS-FRR					
QoS <sup>1</sup> -FRR-B	✓	✗	✗	✗	✗
QoS <sup>2</sup> -FRR-BD	✓	✓	✗	✗	✗
QoS <sup>2</sup> -FRR-BL	✓	✗	✓	✗	✗
QoS <sup>3</sup> -FRR-BDL	✓	✓	✓	✗	✗
QoE-FRR					
QoE-FRR-R	✗	✗	✗	✓	✗
QoE-FRR-MMq	✗	✗	✗	✗	✓

Досить ефективні рішення щодо відмовостійкої маршрутизації із захистом каналу/вузла/шляху та пропускної здатності мережі запропоновані в роботах [248–252, 303, 304], що охоплюють варіанти реалізації як одношляхової, так і багатошляхової стратегій маршрутизації. У [20] було розроблено механізм швидкої перемаршрутизації, адаптований до використання в програмно-конфігурованих мережах з централізованою архітектурою. Водночас контролер, що розраховує основні та резервні маршрути, використовує сценарій ефективного спільного резервування пропускної здатності для резервних шляхів. Отже, запропоноване рішення щодо резервування та

спільного використання пропускної здатності сприяє більш ефективному використанню наявного мережного ресурсу.

У роботах [248, 249] у межах рішень щодо швидкої перемаршрутизації також запропоновано схему захисту пропускної здатності для розрахунку резервних маршрутів, тоді як умови захисту каналу та вузла під час реалізації багатошляхової маршрутизації представлено в лінійній формі.

До того ж уведення системи критеріїв оптимальності рішень з установленням ієрархії співвідношень вагових коефіцієнтів у відповідних цільових функціях дозволило підвищити продуктивність ТКМ та масштабованість рішень щодо швидкої перемаршрутизації, а також знизити їхню обчислювальну складність.

Дворівневий метод швидкої перемаршрутизації з балансуванням навантаження в програмно-конфігурованих мережах, який також передбачає захист рівня якості обслуговування за єдиним показником пропускної здатності, запропоновано в [250]. Метод визначається введенням відповідно до принципу прогнозування взаємодій дворівневої ієрархії розрахунків маршрутних змінних, що відповідають за формування основних і резервних шляхів із реалізацією схем захисту каналу, вузла, шляху та їхньої пропускної здатності й забезпечення збалансованої завантаженості каналів зв'язку мережі потоками, що передаються як основними, так і резервними маршрутами, що відповідає вимогам концепції Traffic Engineering. Також ефективне рішення, основане на концепції ТЕ, було отримано в [60], що є узгодженим рішенням завдань щодо балансування навантаження та швидкої перемаршрутизації із захистом каналу, вузла та пропускної здатності під час розв'язання задачі лінійного програмування.

У праці [251] представлено комплексний метод ієрархічно-координаційної міждоменної швидкої перемаршрутизації для забезпечення захисту приграничних маршрутизаторів ядра мережі на підставі розрахунку основних та резервних міждоменних шляхів як для реалізації одношляхової, так і багатошляхової маршрутизації, оснований на декомпозиційному представленні потокової моделі маршрутизації та використанні принципу цільової координації.

Цей метод дозволяє підвищити масштабованість та відмовостійкість маршрутних рішень. У роботі [252] запропоновано систему поточкових моделей відмовостійкої маршрутизації із захистом шлюзу за замовчуванням під час реалізації функцій відмовостійкості шляхом уведення додаткових керуючих змінних, відповідальних за вибір основного та резервного шлюзів за замовчуванням із балансуванням навантаження між ними, а також забезпеченням погодженого розв'язання задач щодо захисту шлюзу за замовчуванням і швидкої перемаршрутизації в транспортній мережі.

Наступний за складністю клас схем захисту рівня якості обслуговування в ТКМ – це QoS<sup>2</sup>-FRR, що передбачає захист рівня якості обслуговування за двома показниками мережної продуктивності. Так, наприклад, у роботі [57] запропоновано математичну модель відмовостійкої QoS-маршрутизації в мультисервісній ТКМ, за допомогою якої реалізується схема захисту рівня якості обслуговування за показниками пропускної здатності та середньої міжкінцевої затримки пакетів – QoS<sup>2</sup>-FRR-BD. Шукані умови захисту рівня якості обслуговування вдалось отримати на підставі тензорного опису процесу відмовостійкої маршрутизації.

Дуже перспективним напрямом розвитку рішень щодо відмовостійкої маршрутизації є підтримка третього типу схем QoS<sup>3</sup>-FRR, коли реалізується захист рівня якості обслуговування за розширеною множиною показників, наприклад, за трьома показниками мережної продуктивності: пропускною здатністю, середньою міжкінцевою затримкою та ймовірністю втрат пакетів – QoS<sup>3</sup>-FRR-BDL.

Крім того, у випадку, коли основними QoS-показниками в процесі маршрутизації трафіка обрано показники мультимедійної якості, то в ході швидкої перемаршрутизації необхідно забезпечити реалізацію схем QoE-FRR. Відповідно до стандартів ITU-T, під час обслуговування VoIP важливо використовувати схему захисту QoE-FRR-R, яка дозволить уздовж основних і резервних шляхів забезпечити необхідні значення рейтингу якості – R-фактора [176]. Схема QoE-FRR-MMq реалізується в процесі передачі трафіка відео-



телефонії із захистом показників мультимедійної якості (Multimedia Quality, MMq) [177].

### **1.8. Постановка науково-технічної проблеми та її декомпозиція на окремі завдання дослідження**

Аналіз відомих досліджень щодо відмовостійкої маршрутизації дозволив сформулювати перелік ключових вимог, яким мають відповідати перспективні рішення в цьому напрямі:

- урахування багатопотокового та переважно мультимедійного характеру сучасного мережного трафіка, залежно від типу якого в ТКМ необхідно забезпечити гарантії якості обслуговування як за множиною показників мережної продуктивності (NP), так і за показниками якості сприйняття користувачем (QoE);
- забезпечення комплексного характеру рішень щодо одночасної реалізації схем як локального, сегментного та глобального захисту, так і захисту рівня якості обслуговування за показниками NP/QoE;
- реалізація схем захисту рівня якості обслуговування за множиною показників мережної продуктивності – продуктивністю (швидкістю передачі), середньою міжкінцевою затримкою та ймовірністю втрат пакетів залежно від типу мережного трафіка в ТКМ;
- реалізація схем захисту рівня якості обслуговування на рівні користувача за показником R-фактора в процесі передачі голосового трафіка (VoIP) та показником мультимедійної якості (MMq) за умов маршрутизації мультимедійного трафіка в ТКМ;
- забезпечення оптимальності та масштабованості маршрутних рішень із підтримкою якості обслуговування на основі реалізації ієрархічних та ієрархічно-координаційних стратегій маршрутизації в ТКМ.

Системне виконання зазначених вимог технологічного характеру неможливо забезпечити лише на рівні програмної модифікації наявних

алгоритмічних рішень, закладених у протоколи відмовостійкої маршрутизації. Для цього необхідно змінювати та доповнювати теоретичну базу цих протоколів та технологій із переглядом та кардинальним оновленням математичних моделей та розрахункових методів, які так само становили б основу математичного, алгоритмічного та програмного забезпечення перспективних маршрутизаторів, серверів та контролерів маршрутів у ТКМ. Тому набуває актуальності **науково-прикладна проблема**, що полягає в розвитку теорії відмовостійкої маршрутизації чутливого до затримок і втрат трафіка для забезпечення захисту рівня якості обслуговування як за множиною показників мережної продуктивності, так і за показниками якості сприйняття користувачем.

Теоретичні основи, займаючи поряд з емпіричними й методологічними основами ключове місце в складі теорії і визначаючи окремі завдання дослідження, передбачають:

- понятійний апарат, що містить сукупність специфічних понять, категорій, термінів і визначень;
- множину базових моделей теорії;
- науково-методичний апарат, який об'єднує сукупність розроблених у процесі розвитку науки й практики та прийнятих до широкого використання рішень наукових і практичних завдань;
- теоретичні наукові дані – сукупність наукових висновків і рекомендацій, отриманих унаслідок використання методів і теорії в інтересах їхнього подальшого застосування на практиці.

Отже, центральне значення у формуванні теорії та її теоретичних основ мають математичні моделі, які описують об'єкт дослідження (процеси відмовостійкої маршрутизації), та методи, за допомогою яких забезпечується розв'язання поставлених під час дослідження наукових задач та проблем. Саме математичні моделі мають здійснити, по-перше, адекватний взаємопов'язаний опис параметрів мережі й характеристик трафіка, які впливають на рівень

якості обслуговування в ТКМ, а по-друге, забезпечити аналітичну оцінку ступеня впливу цих параметрів на значення QoS-показників (рис. 1.12).

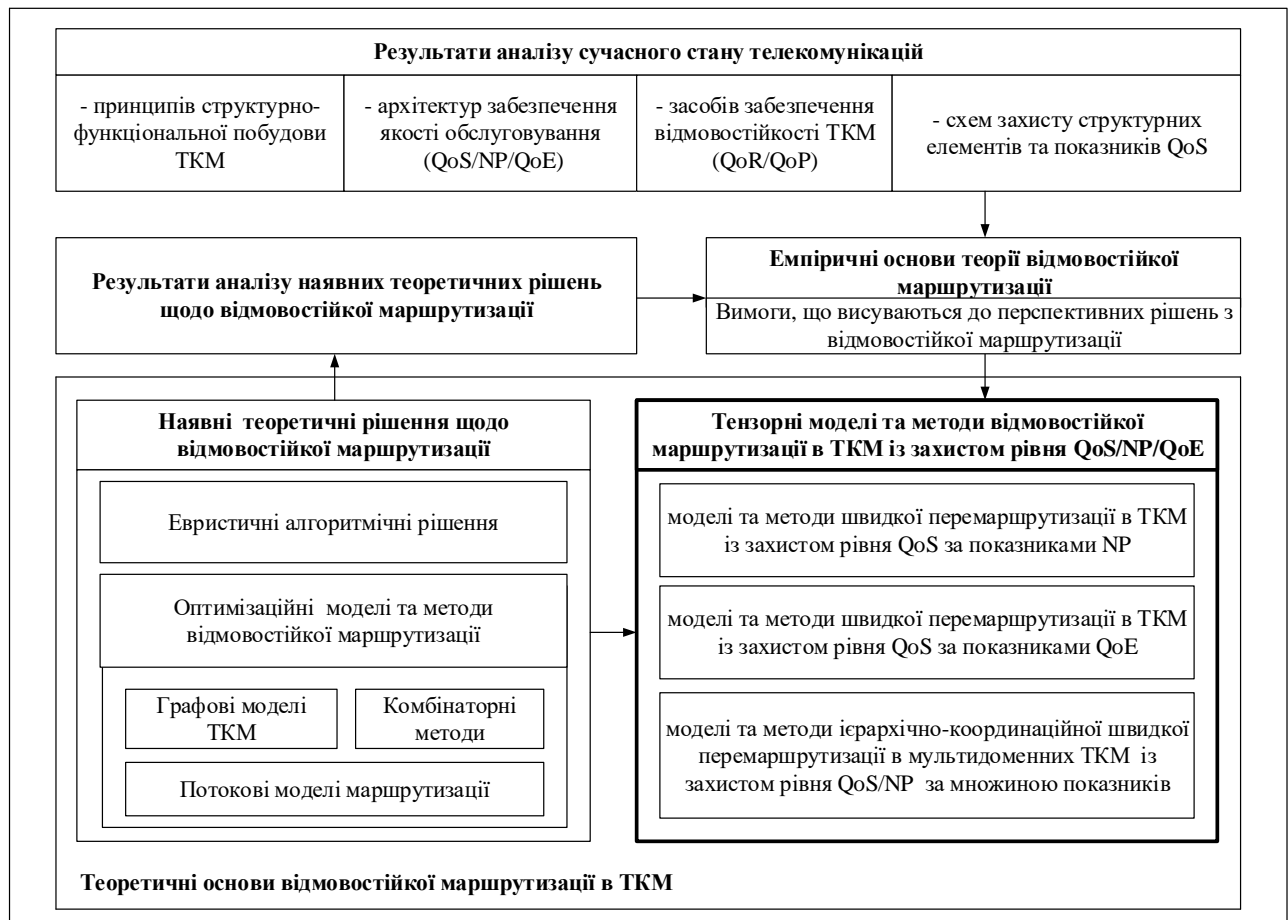


Рис. 1.12. Місце тензорних моделей та методів відмовостійкої маршрутизації із захистом рівня QoS/NP/QoE в структурі її теоретичних основ

Як показали результати проведеного аналізу [1–65], для розв’язання досить широкої множини мережних задач, пов’язаних із забезпеченням якості обслуговування в ТКМ, добре себе зарекомендував математичний апарат тензорного аналізу мереж [46, 50, 53–57]. Його основи були запропоновані американським ученим Г. Кроном [64, 65] й стосувалися переважно варіантів використання в електричних мережах. Цей талановитий науковець також сформулював множину рекомендацій щодо застосування запропонованих ним рішень у різних сферах життєдіяльності людини – від математичних задач лінійного програмування та визначення власних значень матриць до складних задач квантової механіки та аналізу багатоатомних молекул [64, 306].

В останні роки багато вітчизняних та закордонних учених [46, 50, 53–57, 307–310] значно розширили сферу використання тензорного аналізу мереж науково-прикладними рішеннями щодо аналізу та дослідження різноманітних технічних, економічних та соціальних систем, які мають складну мережну архітектуру. У телекомунікаціях апарат тензорного аналізу активно застосовується для дослідження процесів маршрутизації [307, 308], управління каналним, буферним ресурсом [56] та радіоресурсом [309], для профілювання трафіка [55, 310] тощо.

Використання тензорного аналізу мереж базується на геометричному описі ТКМ із введенням відповідних просторів та базисів, які відповідають тому чи іншому аспекту розгляду об'єкта або мережного процесу. Перевагою тензорного підходу є інваріантність форми кінцевих рішень, що є адекватними для всіх зв'язних мережних структур та дисциплін обслуговування, у межах яких можна в аналітичному вигляді отримати рівняння стану елементів ТКМ – її каналів, інтерфейсів тощо. Правила тензорного узагальнення мають відповідати основним постулатам, які запропоновані Г. Кроном та визначають правила переходу від системи скалярних до векторно-матричних рівнянь стану з подальшим їхнім перетворенням (узагальненням) до тензорного вигляду.

Науковцями, які працюють у напрямі використання тензорного підходу, у дослідженнях [46, 50, 53–57, 307–310] встановлено та доведено тензорну природу деяких мережних параметрів, характеристик трафіка та показників якості обслуговування. Так, характеристики трафіка, які відповідають закону збереження потоку пояснюються як контраваріантні тензори, а часові QoS-показники, що мають адитивну природу (наприклад, середня затримка та джитер), традиційно належать до коваріантних тензорів.

Забезпечення тензорного опису ТКМ дозволяє виявити та взаємопов'язано використати дані про її структуру та функціональні параметри, які раніше були прихованими. Уведення просторових метрик, вид та форма яких цілком залежать від реалізованих на інтерфейсах маршрутизаторів мережі дисциплін обслуговування (зокрема в умовах втрат пакетів), дозволяє

адекватно врахувати як характеристики потоків пакетів (їхню інтенсивність передачі, середню довжину тощо), так і параметри безпосередньо інтерфейсів (пропускну здатність, ємність буфера черг тощо). Якщо стан інтерфейсу описується диференціальним рівнянням [307, 311, 312], то просторові метрики стають функцією часу, дозволяючи проводити динамічний аналіз рівня QoS у ТКМ.

Відносно новим напрямом застосування тензорного аналізу мереж є оптимізація процесів відмовостійкої маршрутизації в умовах, коли поряд із локальним/сегментним/глобальним захистом структурних елементів ТКМ (каналу, вузла та маршруту) необхідно забезпечити захист рівня якості обслуговування за множиною QoS-показників уздовж основних та резервних шляхів загалом. Поки що відомі підходи в цьому напрямі обмежувалися рішеннями щодо захисту таких двох важливих показників мережної продуктивності, як пропускну здатність та середня міжкінцева затримка пакетів [57, 104]. Тому тема цієї дисертаційної роботи, присвяченої розробленню теоретичних основ відмовостійкої маршрутизації чутливого до затримок та втрат трафіка в ТКМ із використанням тензорних моделей і методів, є актуальною.

Відповідно до проведеного аналізу сучасного стану та перспектив подальшого розвитку технологічних засобів забезпечення відмовостійкості телекомунікаційних мереж та якості обслуговування користувачів, а також згідно з теоретичними рішеннями щодо відмовостійкої маршрутизації в телекомунікаційних мережах, для вирішення поставленої науково-прикладної проблеми з використанням функціоналу тензорного аналізу мереж у дисертаційній роботі передбачається виконати такі завдання (рис. 1.12):

- розробити та дослідити тензорні моделі телекомунікаційних мереж з удосконаленням умов забезпечення якості обслуговування за множиною показників мережної продуктивності та показників, що сприймаються на рівні користувачів;
- розробити й дослідити моделі та методи швидкої

перемаршрутизації в телекомунікаційних мережах із захистом рівня якості обслуговування за показниками мережної продуктивності;

- розробити та дослідити моделі й методи швидкої перемаршрутизації в телекомунікаційних мережах із захистом рівня якості обслуговування, що сприймається кінцевими користувачами;

- розробити й дослідити моделі та методи ієрархічно-координаційної маршрутизації та швидкої перемаршрутизації в мультидоменних телекомунікаційних мережах із забезпеченням якості обслуговування за множиною показників;

- оцінити ефективність розробленої системи науково-методичних рекомендацій щодо практичного використання запропонованих у дисертації моделей та методів відмовостійкої маршрутизації із захистом рівня якості обслуговування в ТКМ.

## **1.9. Висновки до першого розділу**

1. Проведений у розділі аналіз показав, що однією з ключових властивостей сучасних телекомунікаційних мереж є відмовостійкість. Тобто наявні ТКМ мають бути стійкими до відмов в обслуговуванні, викликаними найрізноманітнішими чинниками як випадкового, так і антагоністичного характеру: збоями апаратного та програмного забезпечення, перевантаженням каналів та вузлів зв'язку, порушенням рівня інформаційної безпеки тощо. Для забезпечення відмовостійкості ТКМ задіюються технологічні можливості всіх рівнів моделі OSI, серед яких важливе значення мають технології та протоколи мережного рівня, а саме протоколи маршрутизації, функції яких у цьому напрямку постійно розширюються.

2. Як показали результати проведеного огляду та класифікації відомих протокольних рішень стосовно відмовостійкої маршрутизації зараз на практиці використовується досить широкий спектр підходів, які відрізняються напрямом застосування, варіантами підтримки різних схем резервування та стратегій

маршрутизації. Загалом вони орієнтовані на використання в мережах пакетної комутації IP та MPLS із реалізацією схем локального захисту (шлюзу за замовчуванням, каналу або вузла). До того ж протоколи маршрутизації, спрямовані на підтримку схем захисту шляху та пропускну здатності мережі, належать до рішень найближчої перспективи.

3. Установлено, що підтримка мультисервісності в сучасних ТКМ тісно пов'язана з необхідністю захисту не тільки пропускну здатності, яка є ключовим QoS-показником якості обслуговування, але й множини інших показників мережної продуктивності, наприклад, середньої міжкінцевої затримки, джитеру, імовірності втрат пакетів, а також якості обслуговування на рівні користувача за показниками R-фактора й мультимедійної якості. Це визначило актуальність напряму досліджень, пов'язаних із забезпеченням захисту рівня якості обслуговування за множиною показників мережної продуктивності та показників, що сприймаються користувачем, у процесі відмовостійкої маршрутизації чутливого до затримок та втрат трафіка в телекомунікаційних мережах.

4. Результати проведеного аналізу теоретичних рішень стосовно QoS-маршрутизації показали, що відомі математичні моделі та методи, які становлять основу перспективних маршрутних протоколів, як правило, базуються на підходах, що орієнтують лише на опосередковане покращення показників якості обслуговування. Це здійснюється переважно або шляхом використання композитних маршрутних метрик, або на підставі реалізації відповідних політик балансування навантаження в ТКМ.

5. Показано, що досить ефективним підходом до розв'язання задач QoS-маршрутизації є використання тензорних моделей ТКМ, за допомогою яких можна здійснити розрахунок шуканих маршрутів із виконанням вздовж них вимог щодо рівня якості обслуговування. У розділі запропоновано використати тензорний підхід у розв'язанні задач відмовостійкої маршрутизації, базуючись на узагальненні та вдосконаленні раніше відомих тензорних моделей та методів QoS-маршрутизації.

6. Отже, для вирішення сформульовано актуальну науково-прикладну проблему, що полягає в розвитку теорії відмовостійкої маршрутизації чутливого та затримок та втрат трафіка в напрямку забезпечення захисту рівня якості обслуговування як за множиною показників мережної продуктивності (NP), так і за показниками якості сприйняття користувачем (QoE). Вирішення сформульованої наукової проблеми передбачає розроблення теоретичних основ відмовостійкої маршрутизації чутливого до затримок та втрат трафіка в телекомунікаційних мережах із використанням тензорних моделей і методів. Проведено декомпозицію сформульованої науково-прикладної проблеми на множину окремих завдань дослідження.



## РОЗДІЛ 2

### **АНАЛІЗ ТА ВДОСКОНАЛЕННЯ ТЕНЗОРНИХ МОДЕЛЕЙ МУЛЬТИСЕРВІСНИХ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ МЕРЕЖ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЯКОСТІ ОБСЛУГОВУВАННЯ ЗА МНОЖИНОЮ ПОКАЗНИКІВ**

Розділ присвячений опису та подальшому вдосконаленню математичних моделей мультисервісних телекомунікаційних мереж у напрямку отримання умов забезпечення якості обслуговування за множиною показників мережної продуктивності (NP) – пропускної здатності, середньої затримки та ймовірності втрат пакетів. Описані тензорні моделі базуються на геометризації структурно-функціональної побудови ТКМ із введенням адекватних просторів, координатних систем та просторових метрик, що загалом враховують характеристики трафіку, дисциплін обслуговування та ключові функціональні параметри мережі – пропускні здатності каналів зв'язку, обсяги буфера черг на маршрутизаторах тощо [53–57, 314–318].

Залежно від напрямку подальшого використання тензорні моделі можуть бути представлені в різних системах координат, наприклад, у базисі гілок мережі, у базисі контурів та вузлових пар, а також у базисі міжполюсних шляхів та внутрішніх вузлових пар. Це дозволяє отримати шукані умови забезпечення якості обслуговування за множиною показників. Водночас такими QoS-показниками можуть бути як показники мережної продуктивності, так і в подальшому показники якості, що сприймається на рівні користувача (QoE). Запропоноване вдосконалення тензорної моделі мультисервісної телекомунікаційної мережі, яка описується в базисах гілок, а також міжполюсних шляхів та внутрішніх вузлових пар, орієнтоване на значне розширення свого напрямку застосування порівняно з раніше відомими подібними рішеннями [46, 53–57, 65, 306–312, 314–324].

Матеріали розділу опубліковані в роботах [77, 82, 83, 85, 104, 120].

## 2.1. Основи геометризації структурно-функціональної побудови мультисервісної телекомунікаційної мережі

### 2.1.1. Принципи введення геометричного простору та систем координат на структурі телекомунікаційної мережі

Як показав аналіз наукових праць, присвячених питанням становлення й розвитку теорії та методології тензорного моделювання ТКМ [53–57, 306–312, 314–324], першочерговим етапом побудови тензорної моделі мультисервісної ТКМ є геометризація її структури. Відповідно до підходу, запропонованого Г. Кроном [64, 65] та розвиненим у роботах [53–57, 77, 82, 83], структура ТКМ буде моделюватись одновимірною мережею  $S = (U, V)$ , що є аналогом одновимірного симпліціального комплексу [306, 308]. Тоді маршрутизатори ТКМ будуть описуватися множиною вузлів мережі  $U = \{u_i, i = \overline{1, m}\}$ , де  $m$  – загальна кількість вузлів у мережі  $S$ . Множина гілок мережі  $V = \{v_z; z = \overline{1, n}\}$  моделює канали зв'язку ТКМ, де  $n$  – загальна кількість гілок у мережі  $S$ . Отже, для опису елементів мережі використовується їхня наскрізна нумерація (рис. 2.1).

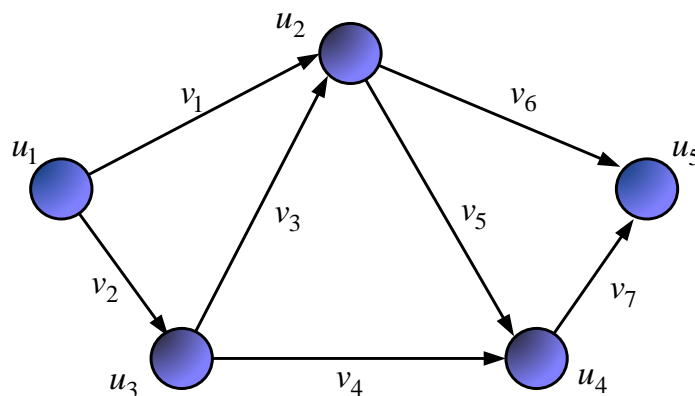


Рис. 2.1. Приклад одновимірної мережі  $S$ , що моделює структуру ТКМ

Полюсами мережі  $S$  є вузли, що моделюють маршрутизатори, через які той чи інший потік пакетів надходить або вибуває з ТКМ.

У подальших дослідженнях також будуть використовуватися такі структурні характеристики мережі  $S$ :

$\mu(S)$  – цикломатичне число, що визначає кількість лінійно незалежних (базисних) контурів у мережі;

$\phi(S)$  – ранг мережі, який установлює число базисних вузлових пар у  $S$ ;

$\kappa(S)$  – кількість лінійно незалежних міжполюсних шляхів у мережі  $S$ ;

$\vartheta(S)$  – кількість базисних внутрішніх вузлових пар у мережі  $S$ , де множина внутрішніх вузлових пар містить усі вузлові пари, крім полюсної.

У випадку моделювання ТКМ зв'язною одновимірною мережею  $S$  наведені структурні характеристики, пов'язані між собою такими залежностями:

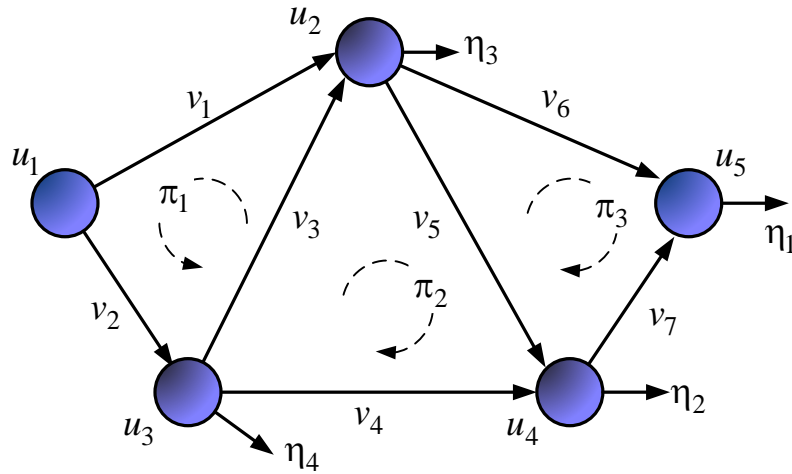
$$\phi(S) = m - 1, \quad \mu(S) = n - m + 1, \quad (2.1)$$

$$\kappa(S) = \mu + 1 = n - m + 2; \quad \vartheta(S) = \phi - 1 = m - 2. \quad (2.2)$$

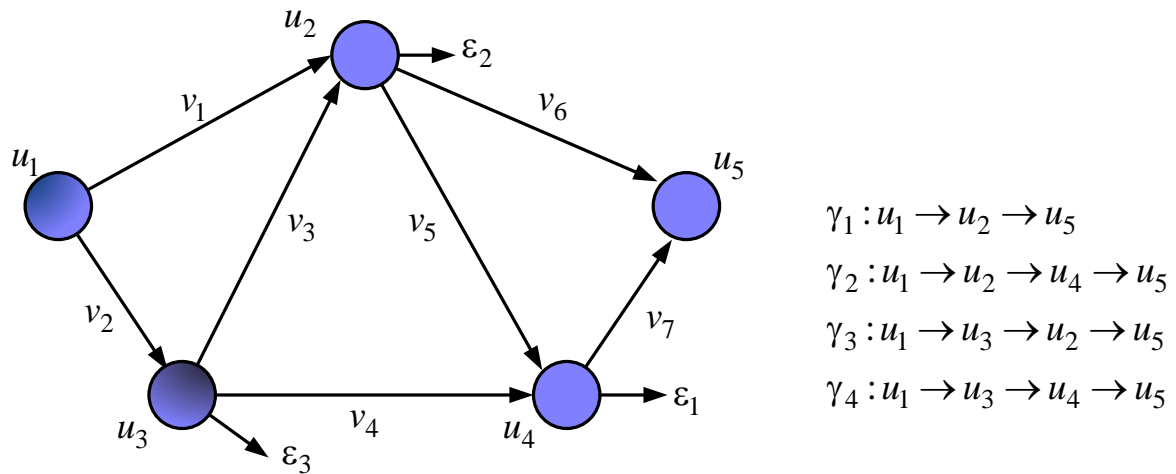
На структурі телекомунікаційної мережі вводиться дискретний  $n$ -вимірний геометричний простір, тобто його розмір визначається кількістю каналів зв'язку в ТКМ. Залежно від аспекту розгляду ТКМ у введеному дискретному  $n$ -вимірному просторі може визначатися ряд систем координат (СК), у яких координатними осями будуть різнотипні базисні шляхи [314–316, 318]: гілки, контури, вузлові пари, розрізи тощо.

На рис. 2.2 показано приклад визначення для мережі  $S$  (рис. 2.1) базисних контурів, вузлових пар та міжполюсних шляхів, коли полюсами були вузли  $u_1$  та  $u_5$ , а основні структурні характеристики приймали такі значення:

$$n = 7, \quad m = 5, \quad \phi(S) = 4, \quad \mu(S) = 3, \quad \kappa(S) = 4, \quad \vartheta(S) = 3.$$



а) приклад визначення базисних контурів та вузлових пар у мережі  $S$



б) приклад визначення базисних міжполюсних шляхів та внутрішніх вузлових пар у мережі  $S$

Рис. 2.2. Приклад визначення для мережі  $S$  (рис. 2.1) базисних контурів, вузлових пар та міжполюсних шляхів

У межах проведеного дослідження до уваги прийматимуться такі ортогональні системи координат, у яких у подальшому взаємопов'язано розглядатимуться проекції тензорів основних функціональних параметрів ТКМ [306, 318]:

– система координат гілок мережі  $\{v_z, z = \overline{1, n}\}$ , проекції тензорів у якій позначатимуться індексом  $v$ ;

– система координат контурів  $\{\pi_i, i = \overline{1, \mu}\}$  та вузлових пар  $\{\eta_j, j = \overline{1, \phi}\}$  мережі, проекції тензора у якій позначатимуться індексом  $\pi\eta$ ;

– система координат міжполюсних шляхів  $\{\gamma_i, i = \overline{1, \kappa}\}$  та внутрішніх вузлових пар  $\{\varepsilon_j, j = \overline{1, \vartheta}\}$  мережі  $S$ , проекції тензора в якій позначатимуться індексом  $\gamma\varepsilon$ .

Ортогональність цих систем координат обґрунтовується тим, що відповідно до виразів (2.1) та (2.2) виконуються такі умови:

$$n = \phi(S) + \mu(S) \quad \text{та} \quad n = \kappa(S) + \vartheta(S). \quad (2.3)$$

### 2.1.2. Особливості тензорного опису телекомунікаційної мережі

У введеному  $n$ -вимірному просторі телекомунікаційна мережа відносно кожного окремо обраного потоку пакетів, для якого необхідно отримати умови забезпечення якості обслуговування, може бути описана за допомогою змішаного двовалентного тензора [306, 318]

$$Q = T \otimes \Lambda, \quad (2.4)$$

де  $\otimes$  – оператор тензорного множення;

$T$  – одновалентний коваріантний тензор середніх затримок пакетів;

$\Lambda$  – одновалентний контраваріантний тензор середніх інтенсивностей потоків у координатних шляхах мережі.

Вираз (2.4) інколи доцільно представляти також в індексній формі:

$$q_j^i = \tau_j \lambda^i, \quad (i, j = \overline{1, n}), \quad (2.5)$$

де  $\tau_j$  – середня затримка пакетів уздовж  $j$ -го координатного шляху (с);

$\lambda^i$  – середня інтенсивність потоку пакетів, що передаються вздовж  $i$ -го координатного шляху (1/с).

У загальному випадку компоненти змішаного двовалентного тензора  $Q$  (2.4) пов'язані між собою за допомогою відповідних метричних тензорів [64, 65]

$$T = E\Lambda \quad \text{та} \quad \Lambda = GT, \quad (2.6)$$

де  $E$  – двічі коваріантний метричний тензор;

$G$  – двічі контраваріантний метричний тензор.

В індексній формі вирази (2.6) приймають такий вигляд:

$$\tau_j = e_{ji} \lambda^i \quad \text{та} \quad \lambda^i = g^{ij} \tau_j, \quad (i, j = \overline{1, n}). \quad (2.7)$$

Тензорні рівняння (2.6) у тій чи іншій системі координат приймають відповідну векторно-матричну форму. Наприклад, у системі координат гілок мережі тензорні рівняння (2.6) набудуть такого вигляду:

$$T_v = E_v \Lambda_v \quad \text{та} \quad \Lambda_v = G_v T_v, \quad (2.8)$$

де  $\Lambda_v$  та  $T_v$  – проекції тензорів  $\Lambda$  та  $T$  у СК гілок відповідно, які представлені  $n$ -вимірними векторами інтенсивності потоку та середньої затримки пакетів у каналах зв'язку ТКМ;

$E_v = \left\| e_{ij}^v \right\|$  – проекція двічі коваріантного метричного тензора  $E$  в СК гілок, яка представлена діагональною  $n \times n$ -матрицею;

$G_v = \left\| g_v^{ij} \right\|$  – проекція двічі контраваріантного метричного тензора  $G$ , що представлена також відповідною діагональною  $n \times n$ -матрицею.

Зокрема має місце таке правило:

$$E_v = [G_v]^{-1}, \quad (2.9)$$

де  $[\cdot]^{-1}$  – операція обернення матриці.

Аналогічно в системі координат контурів та вузлових пар мережі тензорні рівняння (2.6) набудуть вигляду:

$$T_{\pi\eta} = E_{\pi\eta} \Lambda_{\pi\eta} \quad \text{та} \quad \Lambda_{\pi\eta} = G_{\pi\eta} T_{\pi\eta}, \quad (2.10)$$

де  $\Lambda_{\pi\eta}$  та  $T_{\pi\eta}$  – проекції тензорів  $\Lambda$  та  $T$  у СК контурів та вузлових пар, які представлені  $n$ -вимірними векторами інтенсивності потоку та середньої затримки пакетів у відповідних контурах та вузлових парах ТКМ;

$E_{\pi\eta} = \left\| e_{ij}^{\pi\eta} \right\|$  – проекція двічі коваріантного метричного тензора  $E$  в СК контурів та вузлових пар, яка представлена діагональною  $n \times n$ -матрицею;

$G_{\pi\eta} = \left\| g_{\pi\eta}^{ij} \right\|$  – проекція двічі контраваріантного метричного тензора  $G$  в СК контурів та вузлових пар, яка представлена також відповідною діагональною  $n \times n$ -матрицею.

За аналогією з (2.9) справедливим є правило:

$$E_{\pi\eta} = [G_{\pi\eta}]^{-1}. \quad (2.11)$$

На додачу в третьому введеному базисі – системі координат міжполюсних шляхів та внутрішніх вузлових пар мережі тензорні рівняння (2.6) матимуть такий вигляд:

$$T_{\gamma\varepsilon} = E_{\gamma\varepsilon} \Lambda_{\gamma\varepsilon} \quad \text{та} \quad \Lambda_{\gamma\varepsilon} = G_{\gamma\varepsilon} T_{\gamma\varepsilon}, \quad (2.12)$$

де  $\Lambda_{\gamma\varepsilon}$  та  $T_{\gamma\varepsilon}$  – проекції тензорів  $\Lambda$  та  $T$  у СК міжполюсних шляхів та внутрішніх вузлових пар, що представлені  $n$ -вимірними векторами інтенсивності потоку та середньої затримки пакетів у відповідних міжполюсних шляхах та внутрішніх вузлових парах ТКМ;

$E_{\gamma\varepsilon} = \left\| e_{ij}^{\gamma\varepsilon} \right\|$  – проекція двічі коваріантного метричного тензора  $E$  в СК міжполюсних шляхів та внутрішніх вузлових пар, яка представлена діагональною  $n \times n$ -матрицею;

$G_{\gamma\varepsilon} = \left\| g_{\gamma\varepsilon}^{ij} \right\|$  – проекція двічі контраваріантного метричного тензора  $G$  в СК міжполюсних шляхів та внутрішніх вузлових пар, що представлена також відповідною діагональною  $n \times n$ -матрицею.

За аналогією з виразами (2.9) та (2.11) справедливим є правило:

$$E_{\gamma\varepsilon} = \left[ G_{\gamma\varepsilon} \right]^{-1}. \quad (2.13)$$

Як відомо [65, 306, 318], проекції тензорів у різних системах координат пов'язані між собою за допомогою лінійних законів перетворення. Відповідно до [65], закон коваріантного перетворення може бути описаний несингулярною  $n \times n$ -матрицею  $A_{\pi\eta}^v$ , яка визначає правила переходу від СК контурів та вузлових пар до СК гілок мережі. Тоді проекції коваріантного тензора  $T$  в умовах зміни СК перетворюються таким чином:



$$T_v = A_{\pi\eta}^v T_{\pi\eta}. \quad (2.14)$$

Проекція тензора середніх затримок пакетів у системі координат контурів і вузлових пар, яка представлена  $n$ -вимірним вектором  $T_{\pi\eta}$ , має таку структуру [77, 82, 83, 306, 318]:

$$T_{\pi\eta} = \begin{bmatrix} T_\pi \\ - \\ T_\eta \end{bmatrix}; \quad T_\pi = \begin{bmatrix} \tau_1^\pi \\ \vdots \\ \tau_j^\pi \\ \vdots \\ \tau_\mu^\pi \end{bmatrix}; \quad T_\eta = \begin{bmatrix} \tau_1^\eta \\ \vdots \\ \tau_p^\eta \\ \vdots \\ \tau_\phi^\eta \end{bmatrix}, \quad (2.15)$$

де  $T_\pi$  –  $\mu$ -вимірний вектор середніх затримок пакетів у базисних контурах мережі;

$T_\eta$  –  $\phi$ -вимірний вектор середніх затримок пакетів між вузлами, які утворюють базисні вузлові пари;

$\tau_j^\pi$  – середня затримка пакетів в  $j$ -му базисному контурі ( $\pi_j$ );

$\tau_p^\eta$  – середня затримка пакетів між вузлами, які утворюють  $p$ -ту базисну вузлову пару ( $\eta_p$ ).

З іншого боку [65], для цих самих базисів закон контраваріантного координатного перетворення може бути описаний несингулярною  $n \times n$ -матрицею  $C_{\pi\eta}^v$ :

$$\Lambda_v = C_{\pi\eta}^v \Lambda_{\pi\eta}, \quad (2.16)$$

де  $n$ -вимірний вектор  $\Lambda_{\pi\eta}$ , що є проекцією тензора  $\Lambda$  у СК контурів і вузлових пар, має таку структуру:

$$\Lambda_{\pi\eta} = \begin{bmatrix} \Lambda_{\pi} \\ - \\ \Lambda_{\eta} \end{bmatrix}; \quad \Lambda_{\pi} = \begin{bmatrix} \lambda_{\pi}^1 \\ \vdots \\ \lambda_{\pi}^j \\ \vdots \\ \lambda_{\pi}^{\mu} \end{bmatrix}; \quad \Lambda_{\eta} = \begin{bmatrix} \lambda_{\eta}^1 \\ \vdots \\ \lambda_{\eta}^p \\ \vdots \\ \lambda_{\eta}^{\phi} \end{bmatrix}, \quad (2.17)$$

де  $\Lambda_{\pi}$  –  $\mu$ -вимірний вектор інтенсивностей потоку в базисних контурах мережі;  
 $\Lambda_{\eta}$  –  $\phi$ -вимірний вектор інтенсивностей потоку між вузлами, які утворюють базисні вузлові пари;

$\lambda_{\pi}^j$  – інтенсивність потоку в  $j$ -му базисному контурі ( $\pi_j$ );

$\lambda_{\eta}^p(t)$  – інтенсивність потоку, що надходить у мережу й виходить з мережі через вузли, які створюють  $p$ -ту базисну вузлову пару ( $\eta_p$ ).

Важливо зазначити, що матриці ко- й контраваріантного перетворення координат пов'язані між собою умовами ортогональності

$$C_{\pi\eta}^{\nu} (A_{\pi\eta}^{\nu})^t = I, \quad (2.18)$$

де  $I$  – одинична матриця розміру  $n \times n$ ;

$[\cdot]^t$  – операція транспонування матриці.

Аналогічно до (2.14) здійснюється перетворення координат проекції коваріантного тензора  $T$  у процесі переходу від СК міжполюсних шляхів та внутрішніх вузлових пар до СК гілок мережі:

$$T_{\nu} = A_{\gamma\varepsilon}^{\nu} T_{\gamma\varepsilon}, \quad (2.19)$$

де  $A_{\gamma\varepsilon}^{\nu}$  –  $n \times n$ -матриця коваріантного перетворення для цих базисів.

Проекція тензора середніх затримок пакетів у базисі міжполюсних шляхів та внутрішніх вузлових пар, яка представлена  $n$ -вимірним вектором  $T_{\gamma\varepsilon}$ , має таку структуру [77, 82, 83, 318]:

$$T_{\gamma\varepsilon} = \begin{bmatrix} T_{\gamma} \\ - \\ T_{\varepsilon} \end{bmatrix}; \quad T_{\gamma} = \begin{bmatrix} \tau_1^{\gamma} \\ \vdots \\ \tau_j^{\gamma} \\ \vdots \\ \tau_{\kappa}^{\gamma} \end{bmatrix}; \quad T_{\varepsilon} = \begin{bmatrix} \tau_1^{\varepsilon} \\ \vdots \\ \tau_p^{\varepsilon} \\ \vdots \\ \tau_{\vartheta}^{\varepsilon} \end{bmatrix}, \quad (2.20)$$

де  $T_{\gamma}$  –  $\kappa$ -вимірний вектор середніх затримок пакетів уздовж базисних міжполюсних шляхів мережі;

$T_{\varepsilon}$  –  $\vartheta$ -вимірний вектор середніх затримок пакетів між вузлами, які утворюють базисні внутрішні вузлові пари;

$\tau_j^{\gamma}$  – середня затримка пакетів уздовж  $j$ -го базисного міжполюсного шляху ( $\gamma_j$ );

$\tau_p^{\varepsilon}$  – середня затримка пакетів між вузлами, які утворюють  $p$ -ту базисну внутрішню вузлову пару ( $\varepsilon_p$ ).

Закон контраваріантного координатного перетворення за умови зміни розглянутих СК може бути описаний несингулярною  $n \times n$ -матрицею  $C_{\gamma\varepsilon}^{\nu}$  [318]:

$$\Lambda_{\nu} = C_{\gamma\varepsilon}^{\nu} \Lambda_{\gamma\varepsilon}, \quad (2.21)$$

де  $n$ -вимірний вектор  $\Lambda_{\gamma\varepsilon}$ , що є проекцією тензора  $\Lambda$  у СК міжполюсних шляхів та внутрішніх вузлових пар, має таку структуру:

$$\Lambda_{\gamma\varepsilon} = \begin{bmatrix} \Lambda_{\gamma} \\ \text{---} \\ \Lambda_{\varepsilon} \end{bmatrix}; \quad \Lambda_{\gamma} = \begin{bmatrix} \lambda_{\gamma}^1 \\ \vdots \\ \lambda_{\gamma}^j \\ \vdots \\ \lambda_{\gamma}^k \end{bmatrix}; \quad \Lambda_{\varepsilon} = \begin{bmatrix} \lambda_{\varepsilon}^1 \\ \vdots \\ \lambda_{\varepsilon}^p \\ \vdots \\ \lambda_{\varepsilon}^g \end{bmatrix}, \quad (2.22)$$

де  $\Lambda_{\gamma}$  –  $k$ -вимірний вектор інтенсивностей потоку вздовж базисних міжполюсних шляхів мережі;

$\Lambda_{\varepsilon}$  –  $g$ -вимірний вектор інтенсивностей потоку між вузлами, які утворюють базисні внутрішні вузлові пари;

$\lambda_{\gamma}^j$  – інтенсивність потоку вздовж  $j$ -го базисного міжполюсного шляху ( $\gamma_j$ );

$\lambda_{\varepsilon}^p(t)$  – інтенсивність потоку, що надходить у мережу й виходить з мережі через вузли, які створюють  $p$ -ту базисну внутрішню вузлову пару ( $\varepsilon_p$ ).

Аналогічно до виразу (2.18) матриці ко- й контраваріантного перетворення координат у разі зміни зазначених базисів пов'язані між собою умовами ортогональності

$$C_{\gamma\varepsilon}^v (A_{\gamma\varepsilon}^v)^t = I. \quad (2.23)$$

Враховуючи зміст виразів (2.8)–(2.23), можна побудувати алгебраїчну діаграму тензорної моделі мультисервісної ТКМ (рис. 2.3), яка дозволяє наочно визначати порядок перетворень проекцій уведених тензорів за умови переходу від однієї системи координат до іншої.

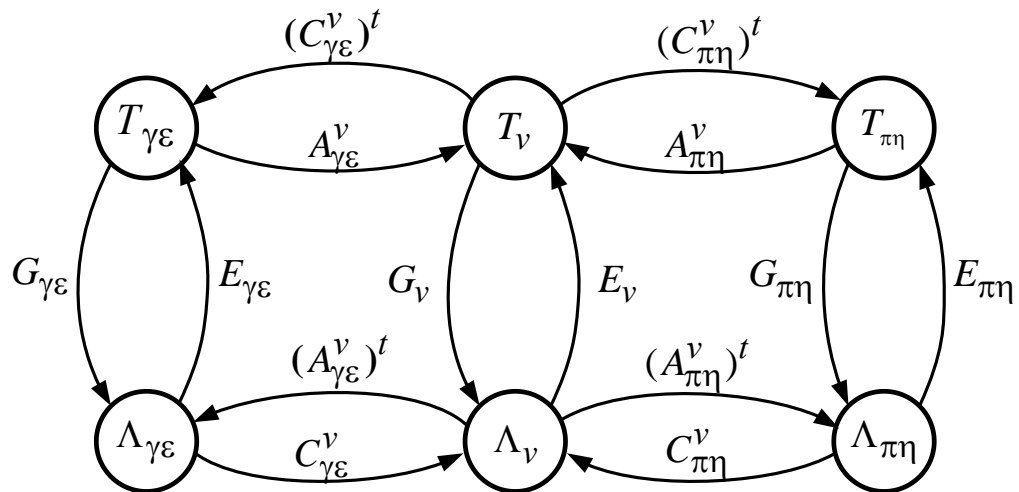


Рис. 2.3. Алгебраїчна діаграма тензорної моделі мультисервісної ТКМ

Правила формування матриць ко- й контраваріантного перетворення координат уведених тензорів за умови зміни описаних систем координат детально розглянуті в роботах [53–56, 306–312, 314–318].

### 2.1.3. Приклади метризації введеного на структурі телекомунікаційної мережі геометричного простору

У цій роботі використовується підхід [314–318, 77, 82, 83, 85], у межах якого обґрунтовано встановлено, що метричні властивості введеного на структурі ТКМ геометричного простору безпосередньо залежать від таких основних функціональних параметрів мережі та її елементів:

- *характеристики мережного трафіку*: кількість потоків, їхні інтенсивності (швидкості передачі пакетів), довжини пакетів тощо;
- *параметри інтерфейсів маршрутизаторів*: пропускна здатність, ступінь завантаженості, максимальний розмір ( $N$ ) та завантаженість буфера черг тощо.

Для наочності будуть продемонстровані особливості метризації введеного на структурі телекомунікаційної мережі геометричного простору для суттєво різних варіантів роботи інтерфейсів маршрутизаторів та мережі загалом. У першому випадку розглядався варіант, коли інтерфейси маршрутизаторів

моделювалися системами масового обслуговування (СМО) із самоподібним вхідним потоком та детермінованим часом обслуговування fBM/D/1. Тоді середню затримку пакетів в  $i$ -му каналі зв'язку ТКМ, яка є відповідною координатою проекції тензора  $T$  у СК гілок мережі ( $T_v$ ), можна розрахувати за допомогою формули [313]

$$\tau_i = \frac{\rho_i^{(H-1/2)/(1-H)}}{(1-\rho_i)^{H/(1-H)} \varphi_i}, \quad (2.24)$$

де  $\varphi_i$  та  $\rho_i$  – пропускна здатність та коефіцієнт використання  $i$ -го каналу зв'язку відповідно:

$$\rho_i = \frac{\lambda_i}{\varphi_i}, \quad \rho_i < 1, \quad (2.25)$$

коли  $\lambda_i$  – це сумарна інтенсивність усіх потоків пакетів, які надходять до  $i$ -го каналу зв'язку ТКМ.

У виразі (2.24) параметр самоподібності (індекс Херста) приймає такі значення:

$$0,5 \leq H \leq 1. \quad (2.26)$$

Якщо вираз (2.24) узагальнити на всю множину каналів зв'язку та привести до векторно-матричного вигляду (2.8), то координати проекції двічі коваріантного метричного тензора  $E$  в системі координат гілок мережі можуть бути представлені значеннями діагональних елементів матриці  $E_v$  [118, 119]:

$$e_{ii}^v = \frac{\rho_i^{(H-1/2)/(1-H)}}{\lambda_{\nu}^i (1-\rho_i)^{H/(1-H)} \varphi_i}, \quad (2.27)$$

де, як зазначалося вище,  $\lambda_{\nu}^i$  – інтенсивність потоку пакетів, який розглядається з точки зору побудови тензорної моделі (2.4), в  $i$ -му каналі зв'язку ТКМ.

У другому випадку основна увага приділена моделюванню роботи інтерфейсів мережі СМО  $M(t)/M(t)/1$  [313, 325–327], коли динаміка зміни середньої затримки пакетів в  $i$ -му каналі зв'язку в часі описувалася за допомогою такого диференціального рівняння:

$$\frac{d\tau_i(t)}{dt} = 1 - \varphi_i \left( \frac{\tau_i(t)}{\lambda_i \tau_i(t) + 1} \right). \quad (2.28)$$

Залучення можливостей середовища MATLAB [328, 329] дозволило отримати в аналітичному вигляді розв'язання диференціального рівняння (2.28):

$$\tau_i(t) = \frac{1}{\varphi_i - \lambda_i} \cdot [(\varphi_i \cdot W(0, -(\lambda_i \cdot \exp(-(\lambda_i + (t - (\lambda_i + \varphi_i \cdot \ln(\exp(-(\lambda_i \cdot (\tau_0 \lambda_i - \tau_0 \varphi_i + 1)) / \varphi_i) \times (\tau_0 \lambda_i - \tau_0 \varphi_i + 1))) / (\varphi_i - \lambda_i)^2) \cdot (\varphi_i - \lambda_i)^2 / \varphi_i)) / \varphi_i)) / \lambda_i + 1)], \quad (2.29)$$

де  $W(\cdot)$  –  $W$ -функція Ламберта;

$\exp(\cdot)$  – експоненціальна функція;

$\tau_0$  – середня затримка пакетів на цьому самому інтерфейсі маршрутизатора в початковий момент часу.

Узагальнюючи вираз (2.29) на всю множину каналів зв'язку, його можна привести до вигляду (2.8). Тоді, наприклад, координати діагональної матриці

$G_v$ , яка є проекцією двічі контраваріантного метричного тензора  $G$  у СК гілок мережі, будуть представлені такими виразами [314–318, 77, 82]:

$$g_v^{ii}(t) = \lambda_v^i (\varphi_i - \lambda_i) \times \\ \times [(\varphi_i \cdot W(0, -(\lambda_i \cdot \exp(-(\lambda_i + (t - (\lambda_i + \varphi_i \cdot \ln(\exp(-\lambda_i \cdot (\tau_0 \lambda_i - \tau_0 \varphi_i + 1)) / \varphi_i)) \times \\ \times (\tau_0 \lambda_i - \tau_0 \varphi_i + 1))) / (\varphi_i - \lambda_i)^2) \cdot (\varphi_i - \lambda_i)^2 / \varphi_i)) / \varphi_i)) / \lambda_i + 1]^{-1}, (i = \overline{1, n}). (2.30)$$

Отже, якщо стан інтерфейсу задається динамічною моделлю (2.28), то, як показано в (2.30), у цьому випадку й метрика введеного простору стає функцією часу, що дозволяє більш точно оцінити в процесі розрахунків значення тих чи інших шуканих координат уведених вище тензорів [318, 77, 82]. Подібний підхід також може бути використаний для тензорного узагальнення динамічних моделей ТКМ, представлених  $M(t)/D/1$  та  $M(t)/E_k(t)/1$  [327].

У третьому випадку розглядався варіант, який є адекватним в умовах перевантаження ТКМ, коли можуть виникати втрати пакетів. Тому увага приділена особливостям моделювання роботи мережних інтерфейсів системами масового обслуговування з відмовами  $M/M/1/N$ . Тоді середню затримку пакетів в  $i$ -му каналі зв'язку можна розрахувати за допомогою такого виразу [313, 316, 314–318, 77, 82]:

$$\tau_i = \frac{\rho_i - \rho_i^{N+2} - (N+1)\rho_i^{N+1}(1-\rho_i)}{\lambda_i(1-\rho_i^{N+1})(1-\rho_i)}. \quad (2.31)$$

У цьому випадку метрика введеного простору стає також функцією від максимальної ємності буфера черг ( $N$ ):



$$g_v^{ii} = \frac{\lambda_i (1 - \rho_i^{N+1})(1 - \rho_i) \lambda_v^i}{\rho_i - \rho_i^{N+2} - (N + 1)\rho_i^{N+1}(1 - \rho_i)}. \quad (2.32)$$

У роботах [314–318] продемонстровано приклади метризації тензорної моделі ТКМ у випадку моделювання роботи інтерфейсу СМО SS/M/1/N, де символ SS вказує на самоподібність вхідного потоку (від англ. selfsimilar).

Аналіз розглянутих прикладів метризації геометричного простору, уведеного на структурі ТКМ, показав, що в загальному випадку координати метричних тензорів є функціями від основних функціональних мережних параметрів та характеристик трафіку. Отже, адекватність тензорних моделей безпосередньо залежить від адекватності покладених у їхню основу скалярних моделей, які математично описують функціонування мережних елементів – маршрутизаторів і каналів зв'язку ТКМ.

## **2.2. Формалізація умов забезпечення якості обслуговування під час використання тензорної моделі мережі, представленої в базисі контурів та вузлових пар**

Маючи достатню інформацію про координати метричних тензорів у базисі гілок мережі (2.27), (2.30) або (2.32), відповідно до діаграми (рис. 2.3) можна отримати закон перетворення в разі зміни систем координат від гілок до контурів та вузлових пар:

$$G_{\pi\eta} = (A_{\pi\eta}^v)^t G_v A_{\pi\eta}^v. \quad (2.33)$$

Проекції двічі контраваріантного метричного тензора  $G$  в СК контурів та вузлових пар, які представлені матрицею (2.33), можна записати в такій декомпозиційній формі:

$$G_{\pi\eta} = \left\| \begin{array}{c|c} G_{\pi\eta}^{\langle 1 \rangle} & G_{\pi\eta}^{\langle 2 \rangle} \\ \hline & \\ G_{\pi\eta}^{\langle 3 \rangle} & G_{\pi\eta}^{\langle 4 \rangle} \end{array} \right\|; \quad G_{\pi\eta}^{\langle 4 \rangle} = \left\| \begin{array}{c|c} G_{\pi\eta}^{\langle 4,1 \rangle} & G_{\pi\eta}^{\langle 4,2 \rangle} \\ \hline & \\ G_{\pi\eta}^{\langle 4,3 \rangle} & G_{\pi\eta}^{\langle 4,4 \rangle} \end{array} \right\|, \quad (2.34)$$

де  $G_{\pi\eta}^{\langle 1 \rangle}$  – квадратна підматриця розміру  $\mu \times \mu$ ;

$G_{\pi\eta}^{\langle 4 \rangle}$  – квадратна підматриця розміру  $\phi \times \phi$ ;

$G_{\pi\eta}^{\langle 2 \rangle}$  – підматриця розміру  $\mu \times \phi$ ;

$G_{\pi\eta}^{\langle 3 \rangle}$  – підматриця розміру  $\phi \times \mu$ ;

$G_{\pi\eta}^{\langle 4,1 \rangle}$  – перший елемент матриці  $G_{\pi\eta}^{\langle 4 \rangle}$ ;

$G_{\pi\eta}^{\langle 4,2 \rangle}$  – підматриця матриці  $G_{\pi\eta}^{\langle 4 \rangle}$  розміру  $1 \times (\phi - 1)$ ;

$G_{\pi\eta}^{\langle 4,3 \rangle}$  – підматриця матриці  $G_{\pi\eta}^{\langle 4 \rangle}$  розміру  $(\phi - 1) \times 1$ ;

$G_{\pi\eta}^{\langle 4,4 \rangle}$  – підматриця матриці  $G_{\pi\eta}^{\langle 4 \rangle}$  розміру  $(\phi - 1) \times (\phi - 1)$ .

У декомпозиційній формі можна також представити вузлові компоненти проєкцій тензорів  $\Lambda$  (2.17) та  $T$  (2.15):

$$\Lambda_{\eta} = \left\| \begin{array}{c} \lambda_{\eta}^1 \\ \hline \Lambda_{\eta-1} \end{array} \right\|, \quad \Lambda_{\eta-1} = \begin{bmatrix} \lambda_{\eta}^2 \\ \vdots \\ \lambda_{\eta}^p \\ \vdots \\ \lambda_{\eta}^{\phi} \end{bmatrix}, \quad T_{\eta} = \left\| \begin{array}{c} \tau_1^{\eta} \\ \hline T_{\eta-1} \end{array} \right\|, \quad T_{\eta-1} = \begin{bmatrix} \tau_2^{\eta} \\ \vdots \\ \tau_p^{\eta} \\ \vdots \\ \tau_{\phi}^{\eta} \end{bmatrix}. \quad (2.35)$$

У цьому випадку координати вектора  $\Lambda_{\eta}$  кількісно визначають значення інтенсивності потоку пакетів між вузлом-джерелом та іншими вузлами мережі. Якщо першою вузловою парою обрати вузли джерело-отримувач пакетів, то

значення  $\lambda_{\eta}^1$  характеризує інтенсивність успішно доставлених (переданих) пакетів. Для вузлів, які стосовно аналізованого потоку пакетів є транзитними, координати  $\lambda_{\eta}^j$  підвектора  $\Lambda_{\eta-1}$  (2.35) визначають для кожного окремого  $j$ -го вузла сумарну за всіма його інтерфейсами інтенсивність потоку втрачених пакетів. Тоді умова забезпечення якості обслуговування за таким важливим показником, як імовірність втрат пакетів, набуває вигляду [83, 85, 104]

$$\sum_{j=2}^{\phi} \lambda_{\eta}^j \leq \lambda^{\langle \text{вим} \rangle} P_{\langle \text{дон} \rangle}, \quad (2.36)$$

де  $\lambda^{\langle \text{вим} \rangle}$  – середня інтенсивність потоку пакетів (1/с) на вході в ТКМ, в інтересах якого побудована тензорна модель (2.4) у підрозділі 2.1;

$P_{\langle \text{дон} \rangle}$  – допустима ймовірність втрат пакетів цього самого потоку в ТКМ.

Фактично значення  $\lambda^{\langle \text{вим} \rangle}$  та  $P_{\langle \text{дон} \rangle}$  визначають QoS-вимоги до рівня пропускної здатності та надійності, які має надати ТКМ для цього потоку.

Перша координата  $\tau_1^{\eta}$  вектора  $T_{\eta}$  (2.35) характеризує значення середньої міжкінцевої затримки пакетів, яка в процесі функціонування ТКМ повинна відповідати умові

$$\tau_1^{\eta} \leq \tau_{\langle \text{дон} \rangle}, \quad (2.37)$$

де  $\tau_{\langle \text{дон} \rangle}$  – допустиме значення середньої міжкінцевої затримки пакетів для обраного потоку в ТКМ, що належить до часових QoS-вимог.

У термінах розглянутої вище тензорної моделі мультисервісної ТКМ, як показано в роботах [77, 82, 104], записані в загальній формі умови забезпечення QoS (2.37) набудуть такої форми:

$$\lambda_{\eta}^1 \leq G_{\pi\eta}^{\langle 4,2 \rangle} \left[ G_{\pi\eta}^{\langle 4,4 \rangle} \right]^{-1} \Lambda_{\eta-1} + \left( G_{\pi\eta}^{\langle 4,1 \rangle} - G_{\pi\eta}^{\langle 4,2 \rangle} \left[ G_{\pi\eta}^{\langle 4,4 \rangle} \right]^{-1} G_{\pi\eta}^{\langle 4,3 \rangle} \right) \tau_{\langle \partial on \rangle}, \quad (2.38)$$

які є справедливими в умовах обмежень

$$T_{\pi} = 0. \quad (2.39)$$

Фізичний зміст обмежень (2.39) полягає в тому, що середні затримки пакетів аналізованого потоку вздовж базисних контурів мережі мають дорівнювати нулю. Це гарантує, як показано в роботах [77, 82, 104], запобігання зациклення пакетів у ТКМ, а також те, що середні затримки пакетів між маршрутизаторами «джерело-отримувач» уздовж усіх задіяних шляхів будуть однакові, що суттєво сприяє мінімізації багатопляхового джитера (варіації затримки) пакетів.

У випадку відсутності втрат пакетів на маршрутизаторах ТКМ, коли, наприклад, мережа недовантажена або буфер черг має необмежену ємність, то  $\lambda_{\eta}^1 = \lambda^{\langle \text{вим} \rangle}$  і  $\Lambda_{\eta-1} = 0$ , а умови (2.38) спростяться до такого вигляду:

$$\lambda^{\langle \text{вим} \rangle} \leq \left( G_{\pi\eta}^{\langle 4,1 \rangle} - G_{\pi\eta}^{\langle 4,2 \rangle} \left[ G_{\pi\eta}^{\langle 4,4 \rangle} \right]^{-1} G_{\pi\eta}^{\langle 4,3 \rangle} \right) \tau_{\langle \partial on \rangle}. \quad (2.40)$$

### 2.3. Формалізація умов забезпечення якості під час використання тензорної моделі мережі, представленої в базисі міжполюсних шляхів і внутрішніх вузлових пар

Аналогічно підходу, представленому в підрозділі 2.2, відповідно до алгебраїчної діаграми (рис. 2.3) можна записати закон перетворення проєкцій

двічі контраваріантного тензора  $G$  за умови зміни систем координат від гілок до міжполюсних шляхів і внутрішніх вузлових пар:

$$G_{\gamma\varepsilon} = (A_{\gamma\varepsilon}^v)^t G_\nu A_{\gamma\varepsilon}^v. \quad (2.41)$$

Тоді з урахуванням (2.20) та (2.22) рівняння (2.41) можна представити у векторно-матричній формі:

$$\begin{bmatrix} \Lambda_\gamma \\ \text{---} \\ \Lambda_\varepsilon \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{\gamma\varepsilon}^{\langle 1 \rangle} & | & G_{\gamma\varepsilon}^{\langle 2 \rangle} \\ \text{---} & & \text{---} \\ G_{\gamma\varepsilon}^{\langle 3 \rangle} & | & G_{\gamma\varepsilon}^{\langle 4 \rangle} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_\gamma \\ \text{---} \\ T_\varepsilon \end{bmatrix}, \quad (2.42)$$

де

$$\begin{bmatrix} G_{\gamma\varepsilon}^{\langle 1 \rangle} & | & G_{\gamma\varepsilon}^{\langle 2 \rangle} \\ \text{---} & & \text{---} \\ G_{\gamma\varepsilon}^{\langle 3 \rangle} & | & G_{\gamma\varepsilon}^{\langle 4 \rangle} \end{bmatrix} = G_{\gamma\varepsilon},$$

$G_{\gamma\varepsilon}^{\langle 1 \rangle}$  – квадратна підматриця розміру  $\kappa \times \kappa$ ;

$G_{\gamma\varepsilon}^{\langle 4 \rangle}$  – квадратна підматриця розміру  $\vartheta \times \vartheta$ ;

$G_{\gamma\varepsilon}^{\langle 2 \rangle}$  – підматриця розміру  $\kappa \times \vartheta$ ;

$G_{\gamma\varepsilon}^{\langle 3 \rangle}$  – підматриця розміру  $\vartheta \times \kappa$ .

Для внутрішніх (неполюсних) вузлів, які стосовно аналізованого потоку пакетів є транзитними, усі координати  $\lambda_\varepsilon^j$  вектора  $\Lambda_\varepsilon$  (2.22) визначають для кожного окремого  $j$ -го вузла сумарну за всіма його інтерфейсами інтенсивність

потоків втрачених пакетів. Тоді, аналогічно до (2.36), умова забезпечення якості обслуговування за ймовірністю втрат пакетів набуває вигляду

$$\sum_{j=1}^9 \lambda_{\varepsilon}^j \leq \lambda^{\langle \text{вим} \rangle} P_{\langle \text{дон} \rangle}. \quad (2.43)$$

Тоді з (2.42) можна отримати в аналітичному вигляді умови забезпечення QoS при тензорному описі ТКМ у системі координат міжполюсних шляхів і внутрішніх вузлових пар:

$$\Lambda_{\gamma} \leq G_{\gamma\varepsilon}^{\langle 2 \rangle} \left[ G_{\gamma\varepsilon}^{\langle 4 \rangle} \right]^{-1} \Lambda_{\varepsilon} + \left( G_{\gamma\varepsilon}^{\langle 1 \rangle} - G_{\gamma\varepsilon}^{\langle 2 \rangle} \left[ G_{\gamma\varepsilon}^{\langle 4 \rangle} \right]^{-1} G_{\gamma\varepsilon}^{\langle 3 \rangle} \right) T_{\langle \text{дон} \rangle}, \quad (2.48)$$

де координати вектора  $\Lambda_{\gamma}$  мають відповідати умовам

$$\sum_{i=1}^k \lambda_{\gamma}^i = \lambda^{\langle \text{вим} \rangle}, \quad (2.49)$$

а всі координати  $k$ -вимірної вектора  $T_{\langle \text{дон} \rangle}$  дорівнювали  $\tau_{\langle \text{дон} \rangle}$ .

Виконання QoS-умов (2.48) та (2.49) спрямовує на те, що середні затримки вздовж усіх базисних шляхів не повинні перевищувати допустимих значень, тобто  $\tau_{\langle \text{дон} \rangle}$ . Це сприяє тому, щоб середня міжкінцева затримка пакетів також не перевищувала  $\tau_{\langle \text{дон} \rangle}$ . Відсутність необхідності виконання умов (2.39) значно спрощує отримання шуканих рішень, проте середні затримки пакетів уздовж різних шляхів між маршрутизаторами «джерело-отримувач» можуть істотно відрізнятись одна від одної.

За аналогією з випадком (2.40), коли втрати пакетів на транзитних маршрутизаторах ТКМ відсутні, тобто якщо  $\Lambda_\varepsilon = 0$ , QoS-умови (2.49) спростяться до вигляду:

$$\Lambda_\gamma \leq \left( G_{\gamma\varepsilon}^{(1)} - G_{\gamma\varepsilon}^{(2)} \left[ G_{\gamma\varepsilon}^{(4)} \right]^{-1} G_{\gamma\varepsilon}^{(3)} \right) T_{\langle \text{don} \rangle}. \quad (2.50)$$

Використання раніше відомих умов забезпечення якості обслуговування (2.37)–(2.40) або (2.48)–(2.50) має таку основну особливість – усі канали зв'язку ТКМ, які беруть участь у визначенні геометричного простору для подальшої побудови тензорної моделі, мають бути задіяними, тобто по ним мають передаватись потоки пакетів. Це здебільшого пов'язано з необхідністю виконання важливих для практики умов (2.39). Тому, як показано в роботах [306, 318, 77, 82], область виправданого використання наведених QoS-умов – це режим роботи ТКМ, близький до перевантаження, що потребує задіяння всіх доступних ресурсів, насамперед каналних, з обов'язковою реалізацією багатошляхових стратегій маршрутизації. Якщо ж для того чи іншого потоку використання всіх доступних каналів зв'язку ТКМ у забезпеченні заданого рівня якості обслуговування не є необхідним, то примусово виключити деякі з них з процесу тензорного опису можна лише на етапі геометризації структури ТКМ, як це, наприклад, показано в роботі [318]. Але процес виключення повинен мати не евристичний, а теоретично обґрунтований характер, оскільки нестача виключеного з розгляду каналного ресурсу може негативно вплинути на рівень QoS у ТКМ.

З огляду на це в дисертації пропонується підхід до тензорного моделювання ТКМ, який є розвитком та вдосконаленням рішень, описаних у попередніх підрозділах, але забезпечує більшу гнучкість та універсальність під різні умови функціонування мережі та QoS-вимоги щодо значень основних показників якості обслуговування.

#### 2.4. Удосконалення умов забезпечення якості обслуговування під час використання тензорної моделі мережі, представленої в базисі міжполюсних шляхів і внутрішніх вузлових пар

Подальші дослідження будуть базуватися на тому, що середня міжкінцева затримка пакетів, які передаються між заданою парою маршрутизаторів за допомогою множини маршрутів  $P$ , розраховується за такою формулою [82, 83]:

$$\tau_{MP} = \sum_{p=1}^{|P|} x_p \tau_p, \quad (2.51)$$

де  $x_p$  – частка потоку пакетів, що були успішно доставлені до маршрутизатора-отримувача за допомогою  $p$ -го шляху;

$\tau_p$  – середня затримка пакетів, які передавались уздовж  $p$ -го шляху в ТКМ;

$|P|$  – потужність множини  $P$ , значення якої визначає загальну кількість доступних для маршрутизації шляхів.

У загальному випадку для розрахунку  $x_p$  може бути використано вираз

$$x_p = \frac{\lambda_p}{\lambda^*}, \quad (2.52)$$

де  $\lambda_p$  – інтенсивність потоку пакетів, які були успішно доставлені до маршрутизатора-отримувача за допомогою  $p$ -го шляху;

$\lambda^*$  – інтенсивність потоку пакетів, які були успішно доставлені до маршрутизатора-отримувача за допомогою всіх доступних шляхів із множини  $P$ . За відсутності втрат пакетів у ТКМ  $\lambda^* = \lambda^{\langle \text{вим} \rangle}$ .

У цьому разі умова забезпечення QoS-вимог за середньою міжкінцевою затримкою пакетів має такий вигляд:



$$\tau_{MP} \leq \tau_{\langle \text{don} \rangle}. \quad (2.53)$$

У рішеннях, які розглядалися у підрозділах 2.2 і 2.3 та описані в роботах [82, 83, 316], виконання умови (2.52) базувалося на тому, що балансування навантаження та розподіл каналного й буферного ресурсу реалізувалися таким чином, щоб середні затримки вздовж кожного з множини використаних шляхів не перевищували допустимого значення, тобто

$$\tau_p \leq \tau_{\langle \text{don} \rangle}, \quad (p \in P). \quad (2.54)$$

Додатковою характерною особливістю рішень з підрозділу 2.2 є те, що всі  $\tau_p$  з (2.51) не тільки не перевищували, але й були рівними між собою. Виконання (2.54) є достатньою, але не необхідною умовою забезпечення якості обслуговування (2.53). Тому далі розглядатиметься рішення, спрямоване на виконання QoS-умов (2.53) для більш загального випадку, тобто без обов'язкової реалізації всіх умов із системи обмежень (2.54), що позитивно вплине на сферу використання отриманих мережних рішень.

Відповідно до змісту алгебраїчної діаграми (рис. 2.3) можна записати закон перетворення проекцій двічі коваріантного тензора  $E$  за умови зміни систем координат – від базису гілок до базису міжполюсних шляхів і внутрішніх вузлових пар:

$$E_{\gamma\epsilon} = (C_{\gamma\epsilon}^v)^t E_v C_{\gamma\epsilon}^v, \quad (2.55)$$

або ж це можна зробити за допомогою виразів (2.41) та (2.13).

Тоді з врахуванням (2.20) та (2.22) рівняння (2.55) можна представити в такій векторно-матричній формі:

$$\begin{bmatrix} T_\gamma \\ \text{---} \\ T_\varepsilon \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_{\gamma\varepsilon}^{(1)} & | & E_{\gamma\varepsilon}^{(2)} \\ \text{---} & & \text{---} \\ E_{\gamma\varepsilon}^{(3)} & | & E_{\gamma\varepsilon}^{(4)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Lambda_\gamma \\ \text{---} \\ \Lambda_\varepsilon \end{bmatrix}, \quad (2.56)$$

де

$$\begin{bmatrix} E_{\gamma\varepsilon}^{(1)} & | & E_{\gamma\varepsilon}^{(2)} \\ \text{---} & & \text{---} \\ E_{\gamma\varepsilon}^{(3)} & | & E_{\gamma\varepsilon}^{(4)} \end{bmatrix} = E_{\gamma\varepsilon},$$

$E_{\gamma\varepsilon}^{(1)}$  – квадратна підматриця розміру  $\kappa \times \kappa$ ;

$E_{\gamma\varepsilon}^{(4)}$  – квадратна підматриця розміру  $\vartheta \times \vartheta$ ;

$E_{\gamma\varepsilon}^{(2)}$  – підматриця розміру  $\kappa \times \vartheta$ ;

$E_{\gamma\varepsilon}^{(3)}$  – підматриця розміру  $\vartheta \times \kappa$ .

З виразу (2.56) можна отримати таку формулу:

$$T_\gamma = E_{\gamma\varepsilon}^{(1)} \Lambda_\gamma + E_{\gamma\varepsilon}^{(2)} \Lambda_\varepsilon. \quad (2.57)$$

Щоб отримати вираз, еквівалентний до (2.51), за аналогією з (2.52) спочатку помножимо ліву й праву частини формули (2.57) на  $\Lambda_\gamma^t$ , а потім поділимо їх на  $\lambda^*$ . Унаслідок проведених перетворень є справедливою така рівність:

$$\tau_{MP} = \frac{1}{\lambda^*} \left( \Lambda_\gamma^t E_{\gamma\varepsilon}^{(1)} \Lambda_\gamma + \Lambda_\gamma^t E_{\gamma\varepsilon}^{(2)} \Lambda_\varepsilon \right). \quad (2.58)$$

Беручи до уваги нерівність (2.53), умова забезпечення якості обслуговування за середньої затримкою пакетів та пропускнуою здатністю в разі ймовірного перевантаження ТКМ набуде вигляду

$$\tau_{\langle \partial on \rangle} \lambda^* \geq \Lambda_{\gamma}^t E_{\gamma \varepsilon}^{\langle 1 \rangle} \Lambda_{\gamma} + \Lambda_{\gamma}^t E_{\gamma \varepsilon}^{\langle 2 \rangle} \Lambda_{\varepsilon}. \quad (2.59)$$

За аналогією з випадками (2.40) та (2.50), тобто за відсутності втрат пакетів на транзитних маршрутизаторах ТКМ (коли  $\Lambda_{\varepsilon} = 0$ ) QoS-умови (2.59) спростяться до такого вигляду:

$$\tau_{\langle \partial on \rangle} \lambda^{\langle \text{вим} \rangle} \geq \Lambda_{\gamma}^t E_{\gamma \varepsilon}^{\langle 1 \rangle} \Lambda_{\gamma}. \quad (2.60)$$

Якщо взяти за основу проведених перетворень проекції двічі контраваріантного тензора  $G$ , то QoS-умови (2.59) та (2.60) набудуть відповідних форм:

$$\tau_{\langle \partial on \rangle} \lambda^* \geq T_{\gamma}^t G_{\gamma \varepsilon}^{\langle 2 \rangle} \left[ G_{\gamma \varepsilon}^{\langle 4 \rangle} \right]^{-1} \Lambda_{\varepsilon} + T_{\gamma}^t \left( G_{\gamma \varepsilon}^{\langle 1 \rangle} - G_{\gamma \varepsilon}^{\langle 2 \rangle} \left[ G_{\gamma \varepsilon}^{\langle 4 \rangle} \right]^{-1} G_{\gamma \varepsilon}^{\langle 3 \rangle} \right) T_{\gamma} \quad (2.61)$$

та

$$\tau_{\langle \partial on \rangle} \lambda^{\langle \text{вим} \rangle} \geq T_{\gamma}^t \left( G_{\gamma \varepsilon}^{\langle 1 \rangle} - G_{\gamma \varepsilon}^{\langle 2 \rangle} \left[ G_{\gamma \varepsilon}^{\langle 4 \rangle} \right]^{-1} G_{\gamma \varepsilon}^{\langle 3 \rangle} \right) T_{\gamma}. \quad (2.62)$$

У використанні тензорних моделей ТКМ необхідно пам'ятати, що в процесі отримання QoS-умов (2.38), (2.48), (2.59) та (2.61) враховувалися лише втрати пакетів на транзитних вузлах у вигляді координат векторів  $\Lambda_{\eta-1}$  або  $\Lambda_{\varepsilon}$ . Щоб забезпечити врахування ймовірних втрат пакетів також на вихідних інтерфейсах маршрутизатора-джерела в ході тензорного моделювання ТКМ,

цей маршрутизатор доцільно описати не одним вузлом мережі  $S$  (рис. 2.1), а двома вузлами ( $u_0$  та  $u_1$ ), які сполучені уявною (віртуальною) гілкою ( $v_0$ ), що має нескінченну пропускну здатність (рис. 2.4). Подібний вибір значення пропускну здатності уявної гілки гарантує відсутність втрат пакетів на вузлі  $u_0$ , а вузол  $u_1$  уже буде входити до нової вузлової пари. Отже, в умовах (2.38), (2.48), (2.59) та (2.61) будуть враховані ймовірні втрати пакетів, викликані перевантаженням відповідних буферів черг на вихідних інтерфейсах маршрутизатора-джерела.

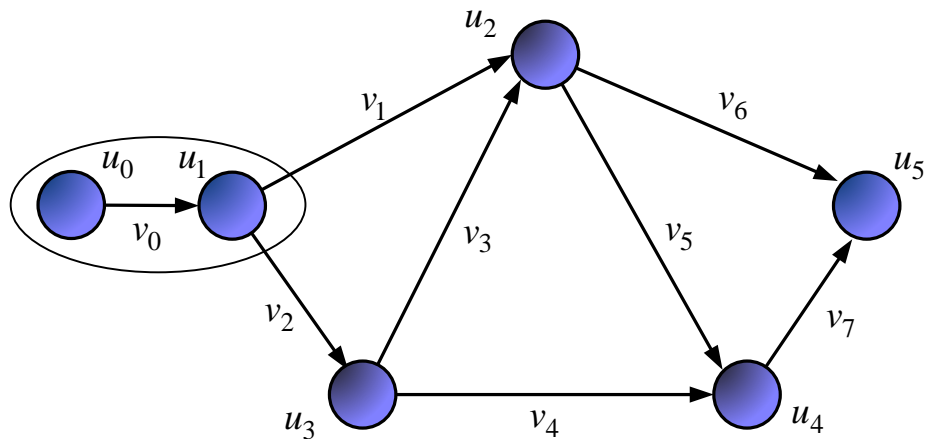


Рис. 2.4. Приклад одновимірної мережі  $S$ , яка моделює структуру ТКМ із врахуванням імовірних втрат пакетів на маршрутизаторі-джерелі потоку пакетів

Уведення умовної гілки призведе до зростання на одиницю розміру введеного на структурі ТКМ геометричного простору. Крім того, зросте кількість базисних гілок та вузлових пар. Кількість базисних контурів залишиться незмінною.

Крім того, серед основних переваг отриманих умов забезпечення якості обслуговування (2.43), (2.59)–(2.62) можна назвати такі:

- взаємопов'язане охоплення одночасно множини різнотипних QoS-показників: швидкості передачі пакетів, середньої міжкінцевої затримки (2.59)–(2.62) та ймовірності втрат пакетів (2.43);

- врахування основних структурних та функціональних параметрів ТКМ, характеристик трафіку та дисциплін обслуговування пакетів;

- аналітична форма умов, що дозволяє забезпечити їхнє використання за умови оптимізації процесів управління трафіком: маршрутизації, розподілу та резервування каналних та буферних ресурсів тощо;

- інваріантність виду отриманих умов, які є справедливими для широкого класу вихідних даних щодо структурно-функціональної побудови ТКМ, характеристик трафіку та використаних на маршрутизаторах дисциплін обслуговування пакетів, зокрема в умовах перевантаження та ймовірних втрат пакетів у процесі реалізації як одношляхової, так і багатошляхової стратегій маршрутизації, алгоритмів статичного та/або динамічного розподілу мережних ресурсів.

Варто зазначити, що вдосконалені умови забезпечення якості обслуговування (2.43), (2.59)–(2.62), отримані завдяки використанню тензорної методології досліджень, як правило, є частиною більш загальної математичної моделі управління трафіком. Водночас, якщо керуючими змінними є інтенсивності потоків у каналах зв'язку, то умови (2.43), (2.59)–(2.62) належать до поточкових моделей маршрутизації [58, 150]. Якщо ж об'єктом управління є пропускна здатність каналів зв'язку та/або буфер черг маршрутизаторів, то запропоновані умови є частиною математичної моделі розподілу або резервування мережних ресурсів.

## **2.5. Базові поточкові моделі маршрутизації в мультисервісних телекомунікаційних мережах**

Як показано в роботах [53–57, 150], структура поточної математичної моделі маршрутизації в ТКМ містить такі умови, що в подальшому, у процесі

формулювання відповідних оптимізаційних задач, є обмеженнями або критеріями оптимальності: умови збереження потоку на окремих маршрутизаторах та в ТКМ загалом; умови запобігання перевантаження каналів зв'язку мережі; умови відсутності петель у розрахованих маршрутах; умови збалансованого завантаження доступних мережних ресурсів; умови реалізації одно- або багатопляхової маршрутизації; умови захисту елементів мережі та її пропускної здатності; а також умови забезпечення гарантованої якості обслуговування в ТКМ.

### **2.5.1. Опис базової потокової моделі маршрутизації без урахування ймовірних втрат пакетів**

За базову потокову модель маршрутизації в ТКМ було обрано рішення, запропоноване, достатньо повно описане та доповнене в роботах [53–57, 150]. Тому нехай структура ТКМ описується орієнтованим графом  $\Gamma = (U, W)$ , де  $U = \{u_i, i = \overline{1, m}\}$  – це фактично введена в підрозділі 2.1 множина вершин (вузлів), що моделюють маршрутизатори мережі, а  $W = \{w_{i,j}, i, j = \overline{1, m}; i \neq j\}$  – множина дуг графа  $\Gamma$ , кожна дуга  $w_{i,j}$  якої моделює канал зв'язку, що з'єднує  $i$ -й та  $j$ -й маршрутизатори ТКМ. Отже, базова модель маршрутизації використовує не наскрізну нумерацію каналів зв'язку (як у підрозділах 2.1–2.4), а подвійну – за номерами суміжних каналів маршрутизаторів. Тобто кожній гілці  $v_z$  мережі  $S$  можна поставити в однозначну відповідність дугу  $w_{i,j}$  графа  $\Gamma$ . Також позначимо через  $\varphi_{i,j}$  пропускну здатність (1/с), що фактично визначається пропускну здатністю  $j$ -го мережного інтерфейсу на  $i$ -му маршрутизаторі телекомунікаційної мережі.

Нехай у мультисервісній ТКМ циркулює множина потоків пакетів  $K$ , які генеруються відповідними мережними додатками. Тоді в процесі розв'язання задач маршрутизації в ТКМ необхідно розрахувати множину маршрутних

змінних  $x_{i,j}^k$ , кожна з яких кількісно визначає частку інтенсивності  $k$ -го потоку ( $k \in K$ ), який направляється за відсутності втрат пакетів і передається в каналі зв'язку, що моделюється дугою  $w_{i,j}$ . Залежно від типу стратегії маршрутизації, яка підтримується в ТКМ, на маршрутні змінні накладаються такі умови:

- у процесі реалізації одношляхової маршрутизації:

$$x_{i,j}^k \in \{0,1\}, \quad (2.63)$$

- у процесі реалізації багатошляхової стратегії маршрутизації:

$$0 \leq x_{i,j}^k \leq 1. \quad (2.64)$$

Фактично виконання умови (2.64) дозволяє використовувати в ТКМ як одношляхову, так і багатошляхову маршрутизацію.

Для забезпечення зв'язності розрахованих маршрутів за відсутності перевантаження маршрутизаторів і ТКМ загалом варто виконати умови збереження потоку [150]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{j:w_{i,j} \in W} x_{i,j}^k - \sum_{j:w_{j,i} \in W} x_{j,i}^k = 1, \quad k \in K, \quad u_i = s_k; \\ \sum_{j:w_{i,j} \in W} x_{i,j}^k - \sum_{j:w_{j,i} \in W} x_{j,i}^k = 0, \quad k \in K, \quad u_i \neq s_k, d_k; \\ \sum_{j:w_{i,j} \in W} x_{i,j}^k - \sum_{j:w_{j,i} \in W} x_{j,i}^k = -1, \quad k \in K, \quad u_i = d_k, \end{array} \right. \quad (2.65)$$

де  $s_k$  – маршрутизатор-джерело (відправник);

$d_k$  – маршрутизатор-отримувач пакетів  $k$ -го потоку.

Для запобігання перевантаження каналів зв'язку ТКМ на маршрутні змінні  $x_{i,j}^k$  накладаються відповідні обмеження:

$$\sum_{k \in K} \lambda_k^{\langle \text{вим} \rangle} x_{i,j}^k < \varphi_{i,j}, \quad (i, j) \in V, \quad (2.66)$$

де  $\lambda_k^{\langle \text{вим} \rangle}$  – середня інтенсивність  $k$ -го потоку пакетів (1/с) на вході в ТКМ, значення якої, як показано в підрозділах 2.1–2.4, напряму визначає вимоги щодо пропускної здатності, необхідної для цього потоку. Фактично в процесі виконання обмежень (2.66) забезпечується реалізація раніше введених умов (2.25), оскільки в межах уведених у цьому підрозділі позначень

$$\rho_{i,j} = \frac{\sum_{k \in K} \lambda_k^{\langle \text{вим} \rangle} x_{i,j}^k}{\varphi_{i,j}}. \quad (2.67)$$

Отже, описані в підрозділі 2.4 умови забезпечення якості обслуговування (2.40), (2.50), (2.60) та (2.62) можуть розглядатись як додаткові обмеження, що накладаються, наприклад, на  $x_{i,j}^k$ , оскільки компоненти

$$\lambda_z = \sum_{k \in K} \lambda_k^{\langle \text{вим} \rangle} x_{i,j}^k \quad \text{та} \quad \lambda_v^z = \lambda_k^{\langle \text{вим} \rangle} x_{i,j}^k \quad (2.68)$$

проекцій метричних тензорів  $E$  та  $G$  безпосередньо залежать від значень маршрутних змінних.

### 2.5.2. Опис базової потокової моделі маршрутизації з урахуванням імовірних втрат пакетів

У реальних умовах функціонування сучасних мультисервісних ТКМ буфер черг маршрутизаторів має обмежений обсяг. Так, наприклад, на



інтерфейсах маршрутизаторів, які випускаються компанією Cisco, за умови використання дисципліни FIFO за замовчуванням організовується одна черга з максимальною ємністю 40 пакетів. У разі налаштування механізму CQ створюється шість черг, кожна з яких має буфер на 20 пакетів, а у випадку застосування механізму PQ максимальні довжини створених чотирьох черг встановлюються від 20 до 80 пакетів. Зокрема основне призначення черги – це буферизація пакетів, які надходять на інтерфейс у межах сплеску інтенсивності потоку пакетів, який може на коротких часових інтервалах призводити до перевантаження каналу зв'язку ТКМ.

У разі переповнення буфера черг пакети з деякою ненульовою ймовірністю відкидаються або в пасивному режимі Tail Drop, або в активному (керованому) режимі, параметри якого визначаються, наприклад, механізмами RED/WRED [185, 295, 321]. Для більш детального врахування чинників, що спричиняють перевантаження елементів ТКМ та мережі загалом, необхідно мати у своєму розпорядженні відповідні математичні моделі, які адекватно описують ці процеси. Тому за основу базової потокової моделі маршрутизації з урахуванням імовірних втрат пакетів на маршрутизаторах ТКМ буде прийнято рішення, запропоноване в роботах [150, 53].

За аналогією з позначеннями, уведеними в пункті 2.5.1, для розв'язання задачі маршрутизації в ТКМ необхідно розрахувати множину маршрутних змінних  $x_{i,j}^k$ . В умовах імовірних втрат пакетів кожна зі змінних  $x_{i,j}^k$  буде визначати долю  $k$ -го потоку пакетів, який направляється з  $i$ -го на  $j$ -й маршрутизатор через відповідний інтерфейс. На маршрутні змінні залежно від типу реалізованої стратегії маршрутизації накладаються обмеження (2.63) або (2.64).

Проте, як показано на рис. 2.5, не всі пакети, що надходять на той чи інший інтерфейс, будуть передаватися відповідним каналом. Частина цих пакетів може бути втрачена, відкинута з черги у зв'язку з її переповненням.

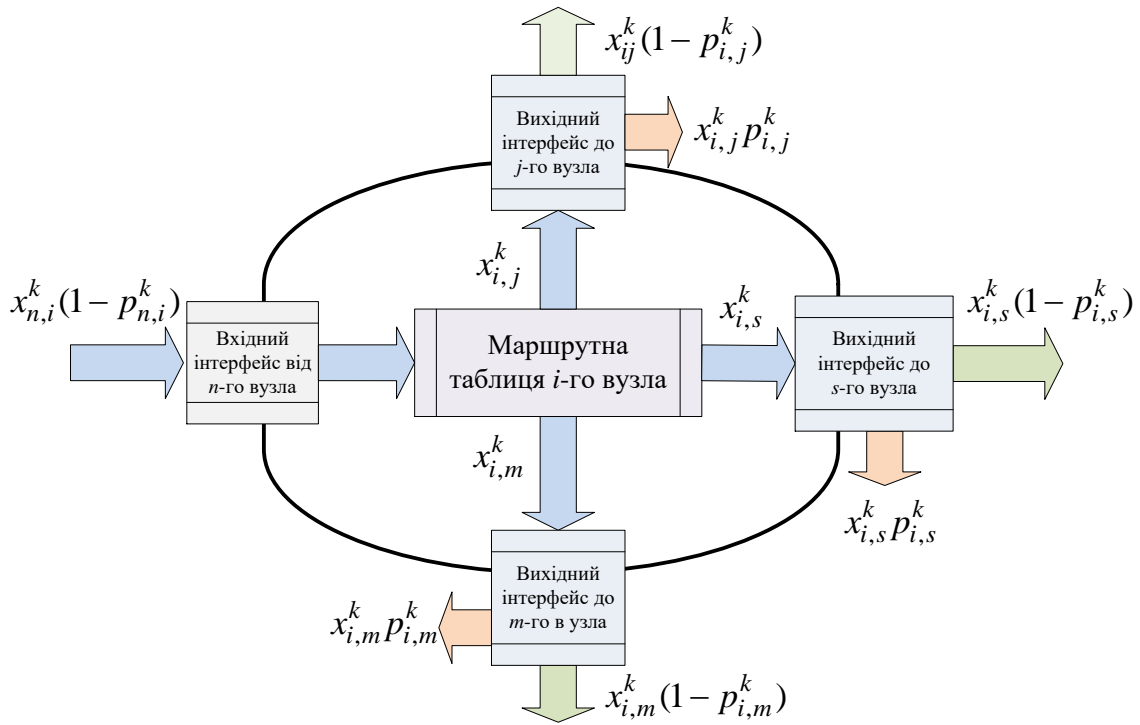


Рис. 2.5. Спрощена архітектура транзитного маршрутизатора (вузла) ТКМ у процесі маршрутизації  $k$ -го потоку в умовах втрат пакетів

Тому позначимо через  $p_{i,j}^k$  імовірність втрат пакетів  $k$ -го потоку на  $j$ -му інтерфейсі  $i$ -го маршрутизатора. Тоді інтенсивність  $k$ -го потоку пакетів, які відкинуті (втрачені) на  $j$ -му інтерфейсі  $i$ -го маршрутизатора, можна розрахувати за допомогою такої формули:

$$r_{i,j}^k = \lambda_k^{(вум)} x_{i,j}^k p_{i,j}^k. \quad (2.69)$$

Відповідно інтенсивність успішно переданих (тобто без втрат) пакетів  $k$ -го потоку в каналі зв'язку, який моделюється дугою  $w_{i,j}$ , визначається таким способом:

$$\lambda_{i,j}^k = \lambda_k^{(вум)} x_{i,j}^k (1 - p_{i,j}^k). \quad (2.70)$$

У разі імовірних втрат пакетів умови (2.65) приймуть таку форму:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{j:w_{i,j} \in W} x_{i,j}^k = 1, \quad k \in K, \quad u_i = s_k; \\ \sum_{j:w_{i,j} \in W} x_{i,j}^k - \sum_{j:w_{j,i} \in W} x_{j,i}^k (1 - p_{j,i}^k) = 0, \quad k \in K, \quad u_i \neq s_k, d_k; \\ \sum_{j:w_{i,j} \in W} x_{j,i}^k (1 - p_{j,i}^k) = b^k, \quad k \in K, \quad u_i = d_k, \end{array} \right. \quad (2.71)$$

де  $b^k$  – частка  $k$ -го потоку пакетів, які були успішно передані (доставлені) мережею від маршрутизатора-джерела до вузла-отримувача.

Умови збереження потоку на маршрутизаторах ТКМ (2.71) мають нелінійний характер, оскільки в загальному випадку ймовірність втрат пакетів є нелінійною функцією як від характеристик трафіку, так і від параметрів самого інтерфейсу. Математична формалізація виразів для розрахунку ймовірності втрат пакетів, як правило, визначається реалізованою дисципліною їхнього обслуговування на інтерфейсі. Наприклад, якщо робота  $j$ -го інтерфейсу  $i$ -го вузла моделюється системою масового обслуговування з відмовами вигляду  $M/M/1/N$ , то ймовірність втрат пакетів  $k$ -го потоку може бути розрахована таким чином:

$$p_{i,j}^k = \frac{(1 - \rho_{i,j})(\rho_{i,j})^N}{1 - (\rho_{i,j})^{N+1}}, \quad (2.72)$$

де коефіцієнт використання  $j$ -го інтерфейсу на  $i$ -му маршрутизаторі ( $\rho_{i,j}$ ) визначається за формулою (2.67).

В умовах обмеженості максимальної довжини черги та випадкового характеру сучасного мережного трафіку виконання обмежень (2.66) не гарантує відсутності перевантаження самої черги. У найкращому випадку в умовах

імовірних втрат пакетів виконання (2.66) фактично забезпечує лише керуваність процесу боротьби з перевантаженням у ТКМ.

Отже, у термінах описаної базової моделі умови забезпечення якості обслуговування за ймовірністю втрат пакетів (2.36) та (2.43) стосовно  $k$ -го потоку можна представити в такому вигляді:

$$p_{\langle \text{don} \rangle}^k \geq p_{\partial}^k \quad \text{при} \quad p_{\partial}^k = 1 - b^k, \quad (2.73)$$

де  $p_{\partial}^k$  та  $p_{\langle \text{don} \rangle}^k$  – дійсне та допустиме значення ймовірності втрат пакетів  $k$ -го потоку в ТКМ загалом.

QoS-умови (2.38), (2.39), або (2.48), (2.49), або ж (2.59) у межах описаної базової моделі (2.63), (2.64), (2.69)–(2.73) є додатковими обмеженнями, що накладаються на керуючі змінні, наприклад, на маршрутні змінні  $x_{i,j}^k$ . На відміну від базової моделі маршрутизації, описаної в підрозділі 2.5.1, проєкції метричних тензорів  $E$  та  $G$  залежать від значень маршрутних змінних таким чином:

$$\lambda_z = \sum_{k \in K} \lambda_k^{\langle \text{вим} \rangle} x_{i,j}^k \quad \text{та} \quad \lambda_v^z = \lambda_k^{\langle \text{вим} \rangle} x_{i,j}^k (1 - p_{i,j}^k). \quad (2.74)$$

У виразах (2.74) визначаються інтенсивності потоків (агрегованого та окремо  $k$ -го) в одному й тому самому каналі зв'язку ТКМ, що в межах наскрізної нумерації моделюється гілкою  $v_z$ , а в разі подвійної нумерації – дугою  $w_{i,j}$ .

### 2.5.3. Система введених критеріїв оптимальності розв'язання задач маршрутизації із забезпеченням якості обслуговування

Спільною ознакою переважної більшості перспективних теоретичних розв'язань задач QoS-маршрутизації є їхнє формулювання в оптимізаційній формі [60, 66, 83, 150], що сприяє підвищенню ефективності використання досить дорогоцінного мережного ресурсу для практичної реалізації вказаних рішень. Зокрема, як показав проведений аналіз [306–312, 314–324], залежно від аспекту та деталізації розгляду маршрутної проблеми, а також повноти врахування зовнішніх та внутрішніх щодо ТКМ чинників оптимізаційні задачі можуть належати до найрізноманітніших класів і типів. Це безпосередньо стосується, наприклад, задач комбінаторної оптимізації, розв'язання яких за допомогою алгоритмів Дійкстри та Беллмана–Форда покладено в більшість наявних маршрутних протоколів, що використовуються в IP/MPLS-мережах [255–261].

Дуже часто задачі маршрутизації в ТКМ у різній своїй постановці відповідають формі оптимізаційних задач математичного програмування [181, 304], водночас найпростіші з них, як правило, формулюються як задачі класу лінійного програмування [304]. До цих рішень, наприклад, належать оптимізаційні моделі багатошляхової маршрутизації із забезпечення балансування навантаження, що опосередковано впливає на покращення рівня якості обслуговування в ТКМ [91, 127, 250]. Проте, коли мова йде про забезпечення вимог щодо кількісних значень основних показників якості обслуговування в процесі розв'язання маршрутних задач, виникає необхідність у введенні в модель або метод маршрутизації в тому чи іншому вигляді математичних виразів для розрахунку цих QoS-показників, наприклад (2.24), (2.31) та (2.72). Ураховуючи те, що формули для розрахунку QoS-показників є винятково нелінійними функціями від параметрів мережі та характеристик трафіку, то й самі оптимізаційні задачі маршрутизації набувають нелінійної форми, що потребує вже використання для їхнього розв'язання відповідних

методів, наприклад, нелінійного програмування [301, 304, 309]. За необхідності врахування динаміки стану ТКМ у формалізації та розв'язанні оптимізаційних задач маршрутизації більшість мережних параметрів стають ще й функцією часу [314, 316, 337, 338]. У цьому випадку в процесі розрахунків активно використовуються методи оптимального управління.

Важливим моментом у постановці, а в подальшому і розв'язанні задачі маршрутизації в ТКМ, є вибір (формулювання) критерію оптимальності маршрутних рішень. Традиційно його зміст повинен мати чітке фізичне трактування з точки зору процесу маршрутизації в ТКМ, а його вигляд і форма мають орієнтувати на можливість отримання шуканого рішення з мінімальними обчислювальними затратами та в реальному часі, тобто вписуватися в наявні таймери оновлення маршрутних таблиць, що становлять у ТКМ десятки секунд [150]. На цей час єдиної форми критерію оптимальності маршрутних рішень, яка б задовольняла більшість висунутих до нього вимог, не існує. З огляду на це науковці, залежно від мети дослідження, застосовують досить потужну систему критеріїв оптимальності маршрутних рішень [150], кожен з яких має певні переваги та недоліки, а отже, і свій напрям пріоритетного використання в тих чи інших умовах функціонування мультисервісної телекомунікаційної мережі.

Умовно критерії оптимальності маршрутних рішень, які надалі в цій роботі знайдуть своє використання, будуть поділені на три групи. *Перша група* критеріїв пов'язана так чи інакше з мінімізацією коефіцієнтів завантаження каналів зв'язку ( $\rho$ ), що відповідно до (2.24), (2.31) та (2.72) позитивно впливає на числові значення основних QoS-показників. *Друга група* критеріїв оптимальності охоплює випадок пошуку екстремуму безпосередньо тих чи інших показників якості обслуговування, якщо застосована математична модель дозволяє забезпечити їхній розрахунок в аналітичному вигляді. Критерії оптимальності *третьої групи* будуються на комбінованому врахуванні як коефіцієнтів завантаження каналів зв'язку, так і в явному вигляді значень QoS-показників.

Прикладом критерію оптимальності першої групи є мінімум такої лінійної цільової функції:

$$J = \sum_{k \in K} \sum_{w_{i,j} \in W} h_{i,j}^x \lambda_k^{\langle \text{вим} \rangle} x_{i,j}^k, \quad (2.75)$$

де  $h_{i,j}^x$  – це маршрутна метрика каналу зв'язку, який з'єднує  $i$ -й та  $j$ -й маршрутизатори ТКМ.

Традиційно маршрутні метрики безпосередньо пов'язані з функціональними параметрами каналів зв'язку, хоча у випадку, коли  $h_{i,j}^x = 1$ , розв'язанням задачі маршрутизації для кожного  $k$ -го потоку пакетів, як правило, є шлях із мінімальною кількістю переприйомів (хопів). Проте, якщо використовувати метрику  $h_{i,j}^x = \varphi^* / \varphi_{i,j}$ , то фактично цільова функція (2.75) буде визначати зважену суму коефіцієнтів завантаження всіх каналів зв'язку. У випадку невеликих значень вагового коефіцієнта  $\varphi^*$  використання подібної метрики призводить до розрахунку шляхів з найменшою сумарною метрикою, тобто з найвищою пропускною здатністю. У разі збільшення значень  $\varphi^*$  за результатами мінімізації (2.75) розраховані шляхи будуть знову ж таки більш критичними також до кількості переприйомів пакетів. У наявних протоколах, наприклад OSPF або IGRP/EIGRP, ваговий коефіцієнт  $\varphi^*$  приймає значення  $10^8$  або  $10^7$ , що можливо пояснюються різними одиницями вимірювання пропускної здатності  $\varphi_{i,j}$ , відповідно біт/с або кбіт/с. У роботі [150] розглядається квадратичний або лінійно-квадратичний варіанти критерію оптимальності (2.75), застосовування яких орієнтує на забезпечення більш збалансованого використання каналного ресурсу ТКМ залежно від значень маршрутних змінних та метрик каналів зв'язку. У цьому випадку канали

зв'язку з меншою маршрутною метрикою використовуються більш інтенсивно, а з більшою – менш інтенсивно.

Дещо інший підхід, пов'язаний із мінімізацією коефіцієнтів завантаження каналів зв'язку ТКМ, запропоновано, наприклад, у роботах [147, 240, 255-259]. У них пропонується мінімізувати верхній поріг завантаженості всіх каналів зв'язку мережі, щоб уникнути ситуації, коли деякі канали ТКМ будуть перевантажені, а деякі – недовантажені. Подібні рішення добре відповідають вимогам концепції Traffic Engineering (TE), розробленої для забезпечення збалансованого використання мережного ресурсу – пропускної здатності каналів зв'язку, буфера черг на маршрутизаторах у процесі розв'язання задач управління трафіком (маршрутизації, розподілу каналного та буферного ресурсу ТКМ). У цьому випадку, як показано в [147, 150, 240], критерієм оптимальності може бути форма

$$\min_{x, \alpha} \alpha, \quad (2.76)$$

де  $\alpha$  – верхній поріг для значень коефіцієнтів завантаженості каналів зв'язку мережі, який має відповідати умовам

$$\frac{\sum_{k \in K} \lambda_k^{\langle \text{вим} \rangle} x_{i,j}^k}{\varphi_{i,j}} < \alpha \leq 1, \quad w_{i,j} \in W. \quad (2.77)$$

У лівій частині нерівності (2.77) фактично представлено вираз для розрахунку коефіцієнта використання ( $\rho$ ) каналу зв'язку, що моделюється дугою  $w_{i,j}$ .

Застосування базової моделі маршрутизації, яка представлена в пункті 2.5.2, та тензорного опису ТКМ, проведеного в підрозділах 2.1–2.4, дозволяє отримати в аналітичному вигляді вирази для розрахунку ключових показників якості обслуговування. Саме ці вирази й можуть слугувати основою



для формулювання критеріїв оптимальності другої групи. Так, наприклад, критерієм оптимальності мережних рішень може бути мінімум зваженої суми середніх міжкінцевих затримок пакетів:

$$J_{\tau} = \sum_{k \in K} pr^k \tau_{MP}^k \rightarrow \min, \quad (2.78)$$

де  $pr^k$  – пріоритет  $k$ -го потоку пакетів;

$\tau_{MP}^k$  – середня міжкінцева затримка пакетів  $k$ -го потоку, що розраховується, наприклад, за допомогою виразів (2.58) та є нелінійною функцією від маршрутних змінних  $x_{i,j}^k$ .

Застосування критерію (2.78) особливо актуальне в процесі використання політики негайної передачі пакетів EF PHB (Expedited Forwarding Per-Hop Behavior), яка відповідно до методу пріоритезації DSCP визначає найвищий пріоритет обслуговування запитів користувачів. Чим вищий пріоритет у того чи іншого потоку пакетів, тим з меншою середньою міжкінцевою затримкою вони будуть передані в ТКМ.

Під час передачі трафіку даних, що є дуже чутливим до ймовірних втрат пакетів, доцільно використовувати критерій, який доставляє максимум наступної цільової функції

$$J_p = \sum_{k \in K} pr^k \lambda_k^{(sum)} b^k \rightarrow \max. \quad (2.79)$$

Цільова функція (2.79) характеризує сумарний за всіма потоками, зважений щодо пріоритету пакетів обсяг даних, доставлених (не втрачених) у мережі. Чим вищий пріоритет у того чи іншого потоку пакетів, тим з меншим рівнем втрат вони будуть доставлені маршрутизатору-отримувачу в ТКМ.

Зважаючи на мультисервісний характер сучасних ТКМ, більшість потоків пакетів, що генеруються відповідними мережними додатками, чутливі до

значень множини QoS-показників. Тому в низці випадків доцільним є використання комбінації критеріїв (2.78) і (2.79):

$$J_{\tau p} = \sum_{k \in K} \left[ h_{\tau}^k pr^k \tau_{MP}^k - h_p^k pr^k \lambda_k^{(вим)} b^k \right] \rightarrow \min, \quad (2.80)$$

де  $h_{\tau}^k$  та  $h_p^k$  – вагові коефіцієнти (метрики), які, по-перше, визначають ступінь чутливості  $k$ -го потоку до міжкінцевих значень середньої затримки та ймовірності втрат пакетів, по-друге, вирівнюють розмірність фізичних величин, які містяться у виразі (2.80).

Чим більш чутливим є  $k$ -й потік пакетів до обраного QoS-показника, тим більші значення приймає відповідна метрика. Інформацію для формування вагових коефіцієнтів  $h_{\tau}^k$  та  $h_p^k$  можна брати, наприклад, з відповідних 4 бітів байту типу обслуговування (Type of Service, ToS), який міститься в заголовку кожного IP-пакета (табл. 2.1). Цей байт містить інформацію про IP-пріоритет або код DSCP пакета [158–167].

Таблиця 2.1

### Варіанти значень поля типу обслуговування в заголовку IP-пакета

Значення поля ToS	Вимоги щодо рівня QoS
1000	мінімальна затримка
0100	максимальна пропускна здатність
0010	максимальна надійність
0001	мінімальна вартість (cost)
0000	послуги без QoS-вимог

Використання критеріїв оптимальності маршрутних рішень, які містять в явному вигляді значення тих чи інших показників якості обслуговування, не забороняє введення до структури оптимізаційної задачі відповідних QoS-умов, наприклад, (2.38), (2.39), (2.48), (2.49) або (2.59) за наявності чітких вимог

(норм) щодо граничних (мінімальних або максимальних) значень обраних QoS-показників:  $\lambda_k^{\langle \text{вим} \rangle}$ ,  $\tau_{\langle \text{дон} \rangle}^k$  та  $P_{\langle \text{дон} \rangle}^k$ .

Основною перевагою у використанні критеріїв оптимальності першої групи є їхня лінійність та пов'язана з цим невисока обчислювальна складність отримання кінцевих маршрутних рішень. Проте головним недоліком цього підходу є опосередкований вплив отриманих рішень на значення більшості QoS-показників. У критеріїв оптимальності другої групи переваги та недоліки є дзеркальними до рішень першої групи. Тому третя група критеріїв оптимальності розв'язання задач маршрутизації, яка базується на комбінації критеріїв першої та другої групи, має на меті доповнити переваги та мінімізувати недоліки наведених маршрутних рішень із розширенням їхнього напрямку застосування. Як приклад, критерії третьої групи можуть використовуватись у тих випадках, коли не для всіх QoS-показників можна отримати аналітичні вирази для їхнього включення до критеріїв. Тоді різні частини цільової функції, мінімум або максимум якої і становить суть критерію оптимальності, можуть відповідати або за визначення того чи іншого показника якості обслуговування, або за врахування, наприклад, коефіцієнтів використання каналів зв'язку ТКМ.

## **2.6. Дослідження процесів маршрутизації за допомогою запропонованої тензорної моделі телекомунікаційної мережі**

### **2.6.1. Аналіз впливу виду критерію оптимальності на характер рішень QoS-маршрутизації з використанням запропонованої тензорної моделі телекомунікаційної мережі**

Для аналізу особливостей розв'язання задач маршрутизації з використанням удосконалених QoS-умов (2.73) та (2.59) було проведено дослідження для різних мережних структур, характеристик трафіку та вимог

щодо рівня якості обслуговування. Загальну методику досліджень продемонструємо на прикладі, у якому визначені такі вихідні дані:

- структура ТКМ представлена на рис. 2.6, якій відповідає одновимірна мережа, що наведена на рис. 2.1;
- на рис. 2.6 у розривах каналів зв'язку вказані їхні пропускні здатності ( $1/c$ );
- перший маршрутизатор був джерелом, а п'ятий – отримувачем пакетів;
- функціонування кожного з інтерфейсів маршрутизаторів моделювалося системою масового обслуговування  $M/M/1/N$ .

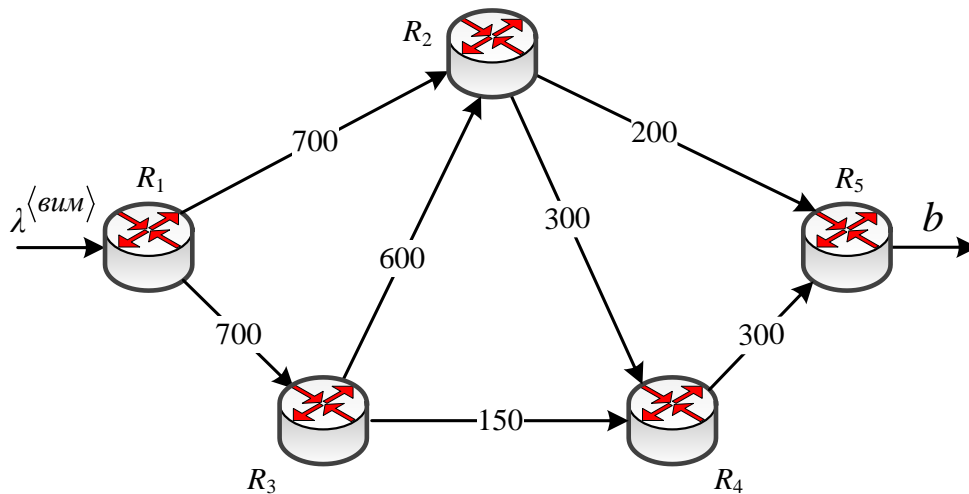


Рис. 2.6. Приклад першого варіанта структури ТКМ, яка підлягала дослідженню

Структура ТКМ (рис. 2.6) визначає 7-вимірний геометричний простір. На рис. 2.1 зображено приклад вибору базису гілок, а на рис. 2.2, б – базису незалежних міжполюсних шляхів та внутрішніх вузлових пар. Тоді матриця коваріантного перетворення координат уведених тензорів буде мати такий вигляд:

$$A_{\gamma\epsilon}^v = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 \\ 0 & 1 & 0 & -1 & 1 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

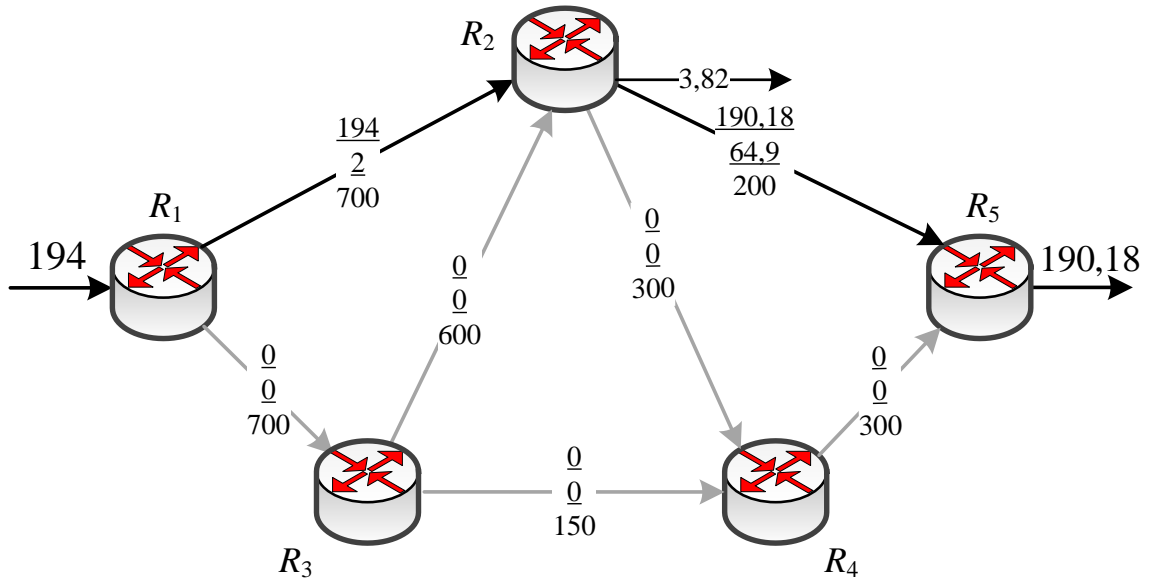
У першому випадку досліджувався вплив виду критерію оптимальності на кінцевий характер рішень щодо QoS-маршрутизації одного потоку пакетів, яка була організована з використанням моделі (2.63), (2.64), (2.66), (2.67), (2.69)–(2.72) та на основі виконання запропонованих QoS-умов (2.59) та (2.73). Як вихідні використовувалися такі дані:

$$\lambda^{\langle \text{вим} \rangle} = 10 \div 485 \text{ 1/с}; \quad \tau_{\langle \text{дон} \rangle} = 80 \text{ мс}; \quad P_{\langle \text{дон} \rangle} = 0,02; \quad N = 30. \quad (2.81)$$

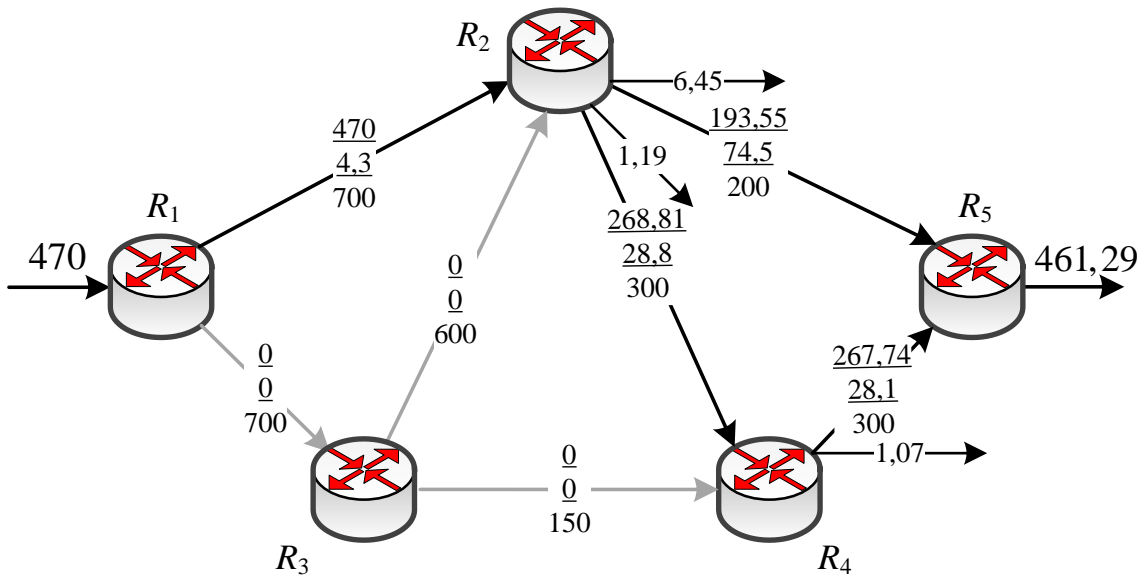
Тоді в умовах використання лінійного критерію оптимальності (2.75) з метриками  $h_{i,j}^x = 10^7 / \varphi_{i,j}$  залежно від вимог щодо значень  $\lambda^{\langle \text{вим} \rangle}$  реалізувався порядок маршрутизації, який представлений на рис. 2.7 та 2.8. На цих рисунках у розривах каналів зв'язку зображено такі дані (згори донизу): інтенсивність потоку пакетів, середня затримка пакетів та його пропускна здатність. У разі втрат пакетів біля відповідного вихідного інтерфейсу маршрутизатора на цих рисунках у розриві стрілочка показано інтенсивність потоку відкинутих пакетів.

Особливістю представленого рішення є підтримка стратегій як одношляхової (рис. 2.7, а), так і багатошляхової QoS-маршрутизації (рис. 2.7, б та 2.8 а, б). У цьому випадку використання критерію оптимальності (2.75) завжди призводило до мінімізації кількості використаних маршрутів, яка безпосередньо залежала від рівня QoS-вимог. Зростання навантаження на ТКМ

$(\lambda^{\langle \text{вим} \rangle})$  супроводжувалось адаптивним збільшенням кількості використаних маршрутів, тобто задоволення більш жорстких QoS-вимог відбувалося за рахунок задіяння додаткового мережного (канального та буферного) ресурсу.

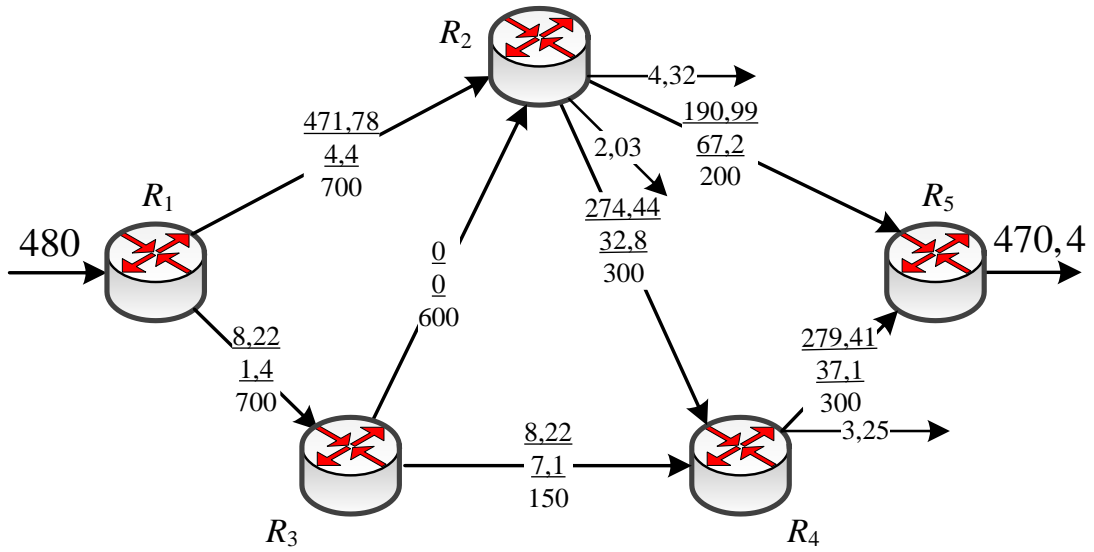


а)  $\lambda^{\langle \text{вим} \rangle} = 194 \text{ 1/c}$

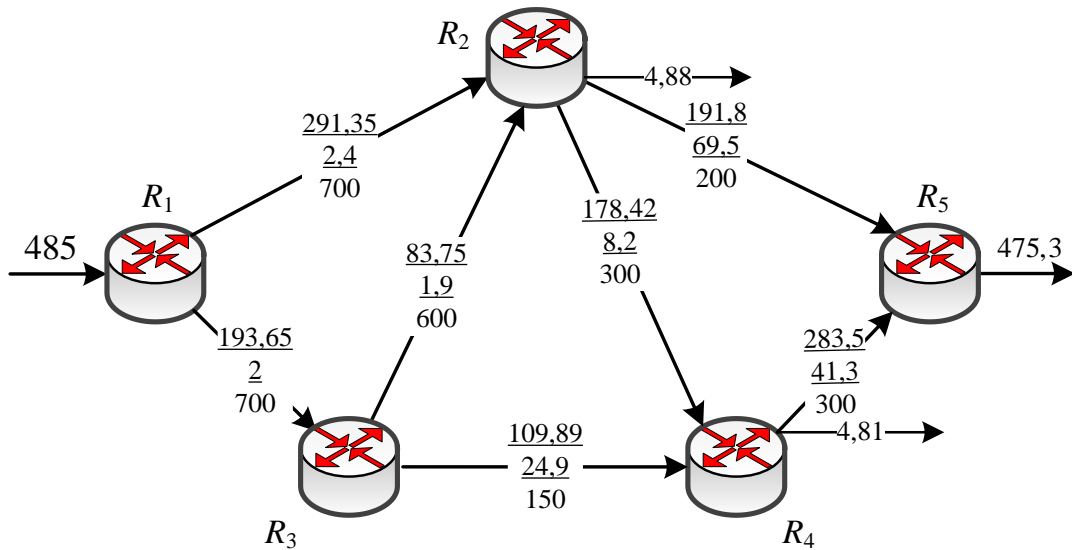


б)  $\lambda^{\langle \text{вим} \rangle} = 470 \text{ 1/c}$

Рис. 2.7. Порядок одно- та двошляхової QoS-маршрутизації потоку пакетів за умови використання критерію оптимальності (2.75)



a)  $\lambda^{(sum)} = 480 \text{ 1/c}$



б)  $\lambda^{(sum)} = 485 \text{ 1/c}$

Рис. 2.8. Порядок три- та чотиришляхової QoS-маршрутизації потоку пакетів за умови використання критерію оптимальності (2.75)

Характеристики розрахованих шляхів та рівень якості обслуговування, який вони забезпечували в ТКМ, детально представлені в табл. 2.2.

Таблиця 2.2

**Характеристики розрахованих маршрутів, показаних на рис. 2.7 та 2.8, під час забезпеченні заданого рівня QoS**

№	$\lambda^{\langle \text{вим} \rangle}$ (1/с)	$\lambda^*$ (1/с)	$ P $	Характеристики розрахованих шляхів			$\tau_{MP}$ (мс)	$P_{\delta}$
				Маршрут	$\lambda_p$ (1/с)	$\tau_p$ (мс)		
1	194	190,18	1	$R_1 \rightarrow R_2 \rightarrow R_5$	190,18	66,9	66,9	0,0197
2	470	461,28	2	$R_1 \rightarrow R_2 \rightarrow R_5$	193,55	78,8	68,6	0,185
				$R_1 \rightarrow R_2 \rightarrow R_4 \rightarrow R_5$	267,74	61,2		
3	480	470,4	3	$R_1 \rightarrow R_2 \rightarrow R_5$	190,99	71,5	72,7	0,02
				$R_1 \rightarrow R_2 \rightarrow R_4 \rightarrow R_5$	271,29	74,3		
				$R_1 \rightarrow R_3 \rightarrow R_4 \rightarrow R_5$	8,12	45,6		
4	485	475,3	4	$R_1 \rightarrow R_2 \rightarrow R_5$	191,8	71,9	64	0,02
				$R_1 \rightarrow R_2 \rightarrow R_4 \rightarrow R_5$	93,09	51,9		
				$R_1 \rightarrow R_3 \rightarrow R_2 \rightarrow R_4 \rightarrow R_5$	82,35	53,4		
				$R_1 \rightarrow R_3 \rightarrow R_4 \rightarrow R_5$	108,06	68,2		

У застосуванні квадратичного аналога критерію оптимальності (2.75) виконання QoS-умов (2.59) та (2.73) досягалося, як правило, з використанням всіх доступних шляхів. Зокрема канали з більшими значеннями маршрутних метрик завантажувалися менше, ніж канали з нижчими значеннями подібних метрик. Використання критерію оптимальності (2.76) також супроводжувалося задіянням усіх доступних шляхів. Проте порядок балансування навантаження був орієнтований на вирівнювання коефіцієнтів використання всіх каналів зв'язку ТКМ, тобто канали завантажувалися пропорційно до їхніх пропускних здатностей, а не маршрутних метрик, як за умови використання лінійного критерію (2.75) та його квадратичного аналога.



У випадку застосування критерію оптимальності (2.79), пов'язаного з мінімізацією такого важливого QoS-показника, як імовірність втрат пакетів у ТКМ, під час маршрутизації були задіяні всі доступні шляхи (рис. 2.9). Позначення на рис. 2.9 аналогічні до тих, що введені на рис. 2.7 та 2.8.

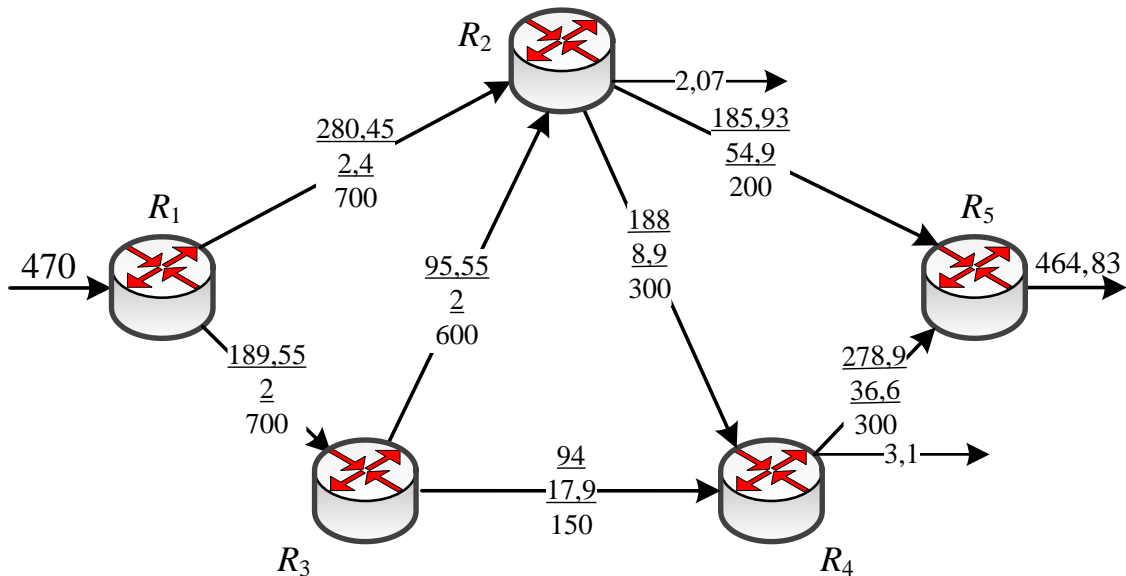


Рис. 2.9. Порядок QoS-маршрутизації потоку пакетів за умови використання критерію оптимальності (2.79)

Характеристики розрахованих маршрутів представлені в табл. 2.3.

Таблиця 2.3

**Характеристики розрахованих маршрутів, показаних на рис. 2.9**

№	$\lambda^{\langle \text{вим} \rangle}$ (1/с)	$\lambda^*$ (1/с)	$ P $	Характеристики розрахованих шляхів			$\tau_{MP}$ (мс)	$P_{\partial}$
				Маршрут	$\lambda_p$ (1/с)	$\tau_p$ (мс)		
1	470	464,83	4	$R_1 \rightarrow R_2 \rightarrow R_5$	185,93	57,3	53,7	0,011
				$R_1 \rightarrow R_2 \rightarrow R_4 \rightarrow R_5$	91,43	47,9		
				$R_1 \rightarrow R_3 \rightarrow R_2 \rightarrow R_4 \rightarrow R_5$	94,5	49,5		
				$R_1 \rightarrow R_3 \rightarrow R_4 \rightarrow R_5$	92,97	56,4		

Порівняно з аналогічним рішенням (табл. 2.2) для  $\lambda^{(вим)} = 470$  1/с вдалося знизити як середню міжкінцеву затримку, так і ймовірність втрат пакетів у ТКМ.

В умовах використання критерію оптимальності (2.78), який призводить до мінімізації середньої міжкінцевої затримки пакетів у ТКМ, у процесі QoS-маршрутизації знову ж таки застосовувалися всі доступні шляхи (рис. 2.10). Позначення на рис. 2.10 аналогічні до тих, що введені на рис. 2.7–2.9.

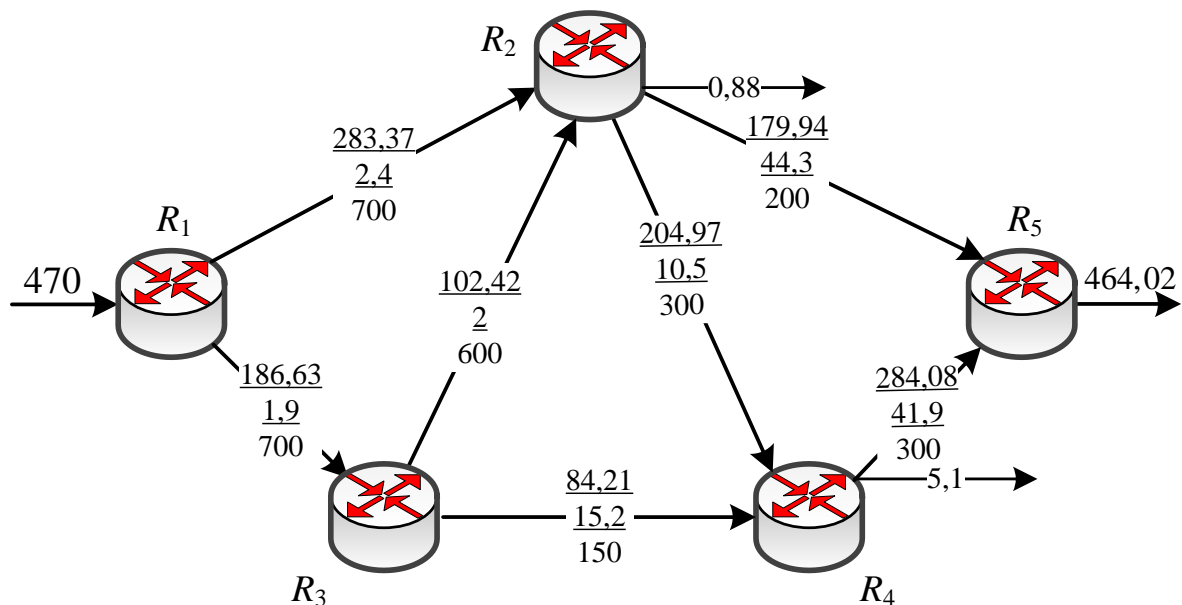


Рис. 2.10. Порядок QoS-маршрутизації потоку пакетів за умови використання критерію оптимальності (2.78)

Характеристики розрахованих маршрутів (рис. 2.10) представлені в табл. 2.4. Порівняно з аналогічними рішеннями, описаними в табл. 2.2 і 2.3 для  $\lambda^{(вим)} = 470$  1/с, вдалося знизити середню міжкінцеву затримку пакетів. Проте використання критерію (2.79) прогнозовано забезпечило меншу ймовірність втрат пакетів у ТКМ.

**Характеристики розрахованих маршрутів, показаних на рис. 2.10**

№	$\lambda^{\langle \text{вим} \rangle}$ (1/с)	$\lambda^*$ (1/с)	$ P $	Характеристики розрахованих шляхів			$\tau_{MP}$ (мс)	$P_{\partial}$
				Маршрут	$\lambda_p$ (1/с)	$\tau_p$ (мс)		
1	470	464,02	4	$R_1 \rightarrow R_2 \rightarrow R_5$	179,94	46,7	52,8	0,0127
				$R_1 \rightarrow R_2 \rightarrow R_4 \rightarrow R_5$	100,74	54,8		
				$R_1 \rightarrow R_3 \rightarrow R_2 \rightarrow R_4 \rightarrow R_5$	100,61	56,4		
				$R_1 \rightarrow R_3 \rightarrow R_4 \rightarrow R_5$	82,73	59,1		

Отже, у межах розглянутих прикладів запропонована вдосконалена тензорна модель ТКМ як на рівні запропонованих QoS-умов (2.59) і (2.73), так і розглянутих QoS-критеріїв оптимальності (2.78) та (2.79), підтвердила свою адекватність у розв'язанні задач одно- й багатошляхової маршрутизації. Удосконалена тензорна модель ТКМ адаптивно реагувала на зміну завантаженості мережі та виду критерію оптимальності маршрутних рішень з точки зору забезпечення заданих значень показників якості обслуговування – швидкості передачі ( $\lambda^{\langle \text{вим} \rangle}$ ), середньої міжкінцевої затримки ( $\tau_{\langle \text{don} \rangle}$ ) та ймовірності втрат пакетів ( $P_{\langle \text{don} \rangle}$ ).

### 2.6.2. Порівняльний аналіз рішень задач маршрутизації з підтримкою якості обслуговування

Для оцінки ефективності маршрутних рішень у ТКМ було проведено порівняльний аналіз запропонованої тензорної моделі з відомими аналогами для різних мережних структур та QoS-вимог. Порівнянню підлягали такі моделі маршрутизації:

- запропонована вдосконалена тензорна модель маршрутизації в ТКМ (model 1), представлена виразами (2.64), (2.66), (2.67), (2.69)–(2.72), QoS-умовами (2.59) та (2.73) і критерієм оптимальності (2.78);

- раніше відома тензорна модель маршрутизації в ТКМ (model 2) [56, 307, 308], яка представлена виразами (2.64), (2.66), (2.67), (2.69)–(2.72), QoS-умовами (2.59), (2.38) та (2.39) і критерієм оптимальності (2.78);

- потокова модель маршрутизації в ТКМ (model 3), що представлена виразами (2.64), (2.66), (2.67), (2.69)–(2.72) та критерієм оптимальності (2.79);

- потокова модель маршрутизації в ТКМ (model 4), що представлена виразами (2.64), (2.66), (2.67), (2.69)–(2.72) і квадратичним аналогом критерію оптимальності (2.75);

- потокова модель маршрутизації в ТКМ (model 5), що представлена виразами (2.64), (2.66), (2.67), (2.69)–(2.72), (2.77) та критерієм оптимальності (2.76), який відповідає вимогам концепції Traffic Engineering.

Перший варіант структури ТКМ, який досліджувався, зображений на рис. 2.6. Вимоги щодо рівня QoS відповідали умовам (2.81). Робота кожного з інтерфейсів маршрутизаторів знову моделювалась системою масового обслуговування M/M/1/N, де  $N = 30$ . Тоді на рис. 2.11 та 2.12 показано залежність середньої міжкінцевої затримки пакетів  $\tau_{MP}$  (2.51) та відповідно ймовірності втрат пакетів  $p_D$  (2.73) від інтенсивності вхідного потоку пакетів  $\lambda^{\langle \text{вхл} \rangle}$  для п'яти порівнюваних моделей маршрутизації.

На рис. 2.13 зображено виражений у відсотковому відношенні вигащ за середньою міжкінцевою затримкою пакетів ( $\tau_{MP}$ ) від застосування запропонованої моделі model 1 порівняно з іншими моделями маршрутизації залежно від інтенсивності вхідного потоку пакетів  $\lambda^{\langle \text{вхл} \rangle}$ .

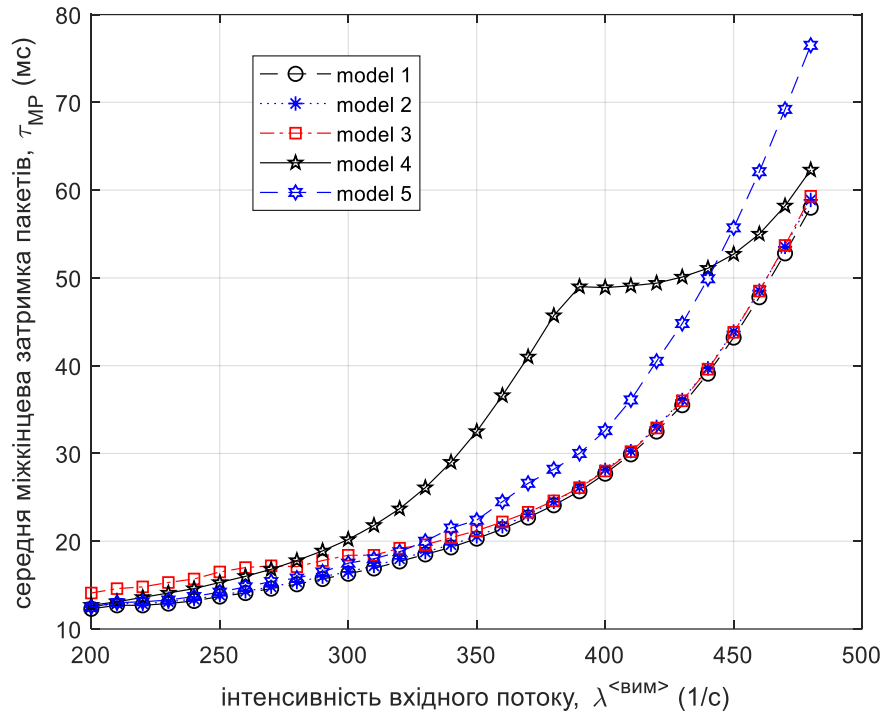


Рис. 2.11. Залежність середньої міжкінцевої затримки пакетів  $\tau_{MP}$  (2.51) від інтенсивності вхідного потоку пакетів  $\lambda^{(вим)}$  для п'яти порівнюваних моделей маршрутизації

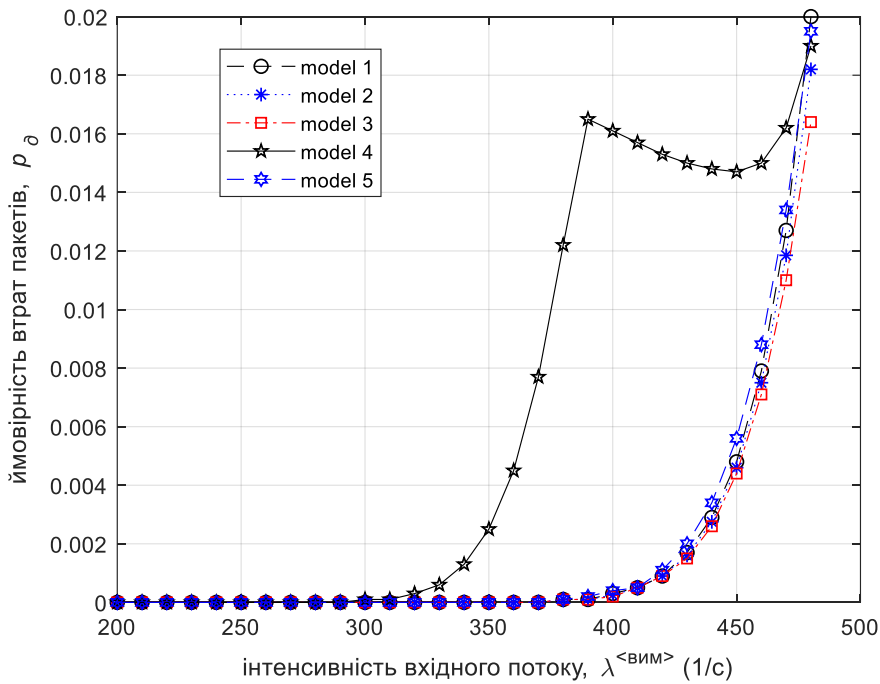


Рис. 2.12. Залежність імовірності втрат пакетів  $p_\delta$  (2.73) від інтенсивності вхідного потоку пакетів  $\lambda^{(вим)}$  для п'яти порівнюваних моделей маршрутизації

На рис. 2.13, наприклад, крива «виграш 1-2» вказує на переваги у використанні моделі model 1 порівняно з рішенням model 2. На цьому рисунку також показано область високих навантажень, коли  $\lambda^{\langle \text{вим} \rangle} = 440 \div 485$  1/с, оскільки саме в цьому діапазоні навантажень для всіх моделей уже спостерігалися втрати пакетів, але вони не перевищували встановлені допуски, тобто  $p_d \leq 0,02$  (рис. 2.12).

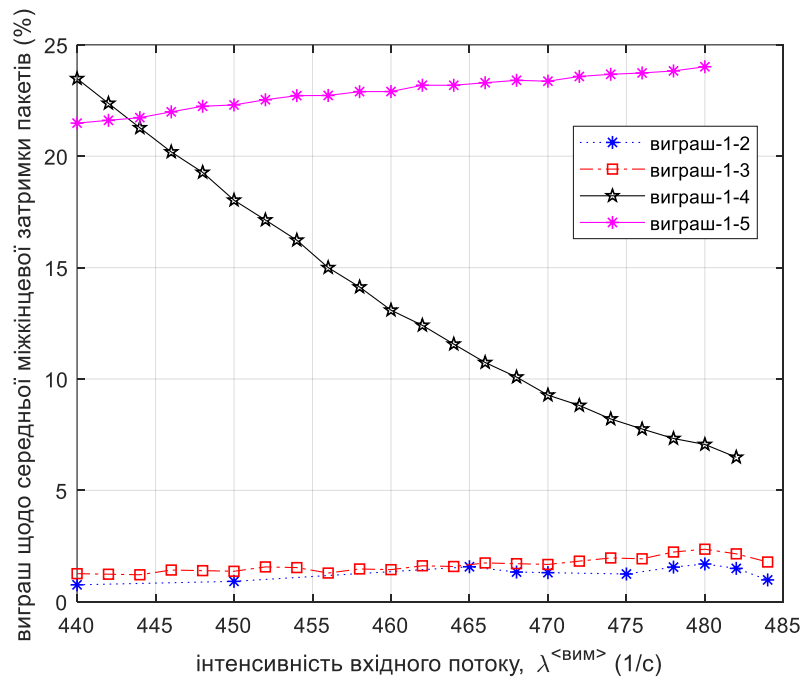


Рис. 2.13. Виграш за середньою міжкінцевою затримкою пакетів від застосування запропонованої моделі (model 1) порівняно з іншими моделями маршрутизації залежно від інтенсивності вхідного потоку пакетів  $\lambda^{\langle \text{вим} \rangle}$  (перший варіант структури ТКМ)

Отже, можна зробити висновок, що для першого варіанта структури ТКМ (рис. 2.6) застосування запропонованої тензорної моделі маршрутизації дозволяє отримати такий виграш за середньою міжкінцевою затримкою пакетів в області високих навантажень (рис. 2.13):

- порівняно з model 5 в середньому від 21,5 % до 24 %;
- порівняно з model 4 – від 6 % до 23,5 %;

- порівняно з model 2 та 3 – від 1,5 % до 2,5 %.

Другий варіант структури досліджуваної ТКМ, що порівняно з першою структурою мережі (рис. 2.6) складалася з меншої кількості маршрутизаторів та каналів зв'язку, представлено на рис. 2.14. Позначення на рис. 2.14 аналогічні до рис. 2.6. Джерелом пакетів був перший маршрутизатор, а отримувачем пакетів – п'ятий маршрутизатор. Робота кожного з інтерфейсів маршрутизаторів знову моделювалася системою масового обслуговування М/М/1/Н за умови  $N = 25$ .

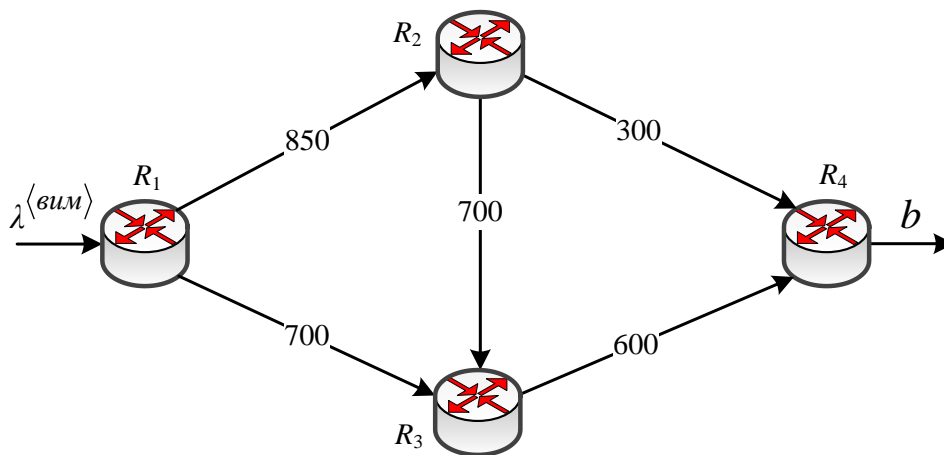


Рис. 2.14. Приклад другого варіанта структури ТКМ, яка підлягала дослідженню

Як вихідні використовувалися такі дані:

$$\lambda^{\langle \text{вим} \rangle} = 10 \div 840 \text{ 1/с}; \quad \tau_{\langle \text{дон} \rangle} = 50 \text{ мс}; \quad P_{\langle \text{дон} \rangle} = 0,02. \quad (2.82)$$

Дослідженню підлягали ті самі п'ять моделей маршрутизації (рис. 2.15). На рис. 2.15 та 2.16 показано область високого навантаження на ТКМ, коли  $\lambda^{\langle \text{вим} \rangle} = 820 \div 840 \text{ 1/с}$ , оскільки саме в цьому випадку вже спостерігалися втрати пакетів, але вони не перевищували встановлені допуски, тобто  $p_{\partial} \leq 0,02$ .

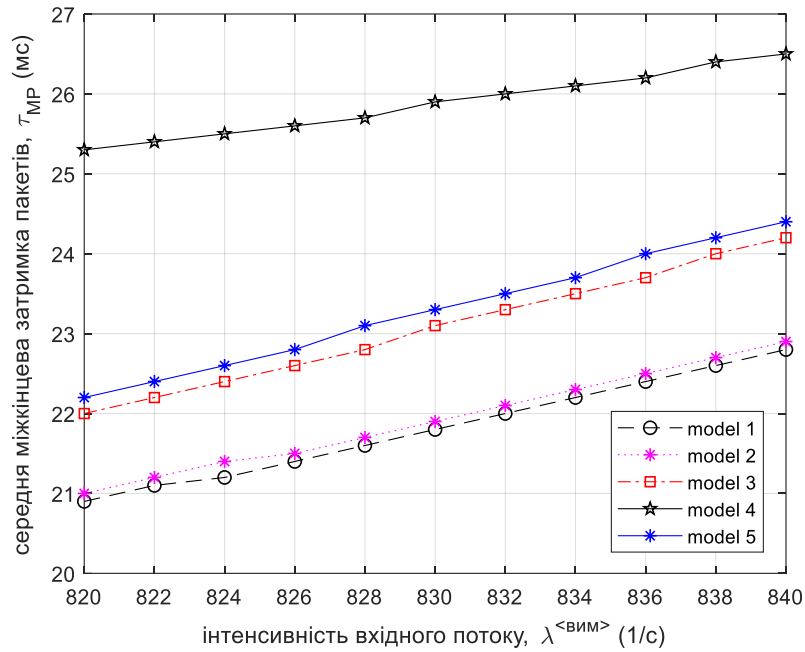
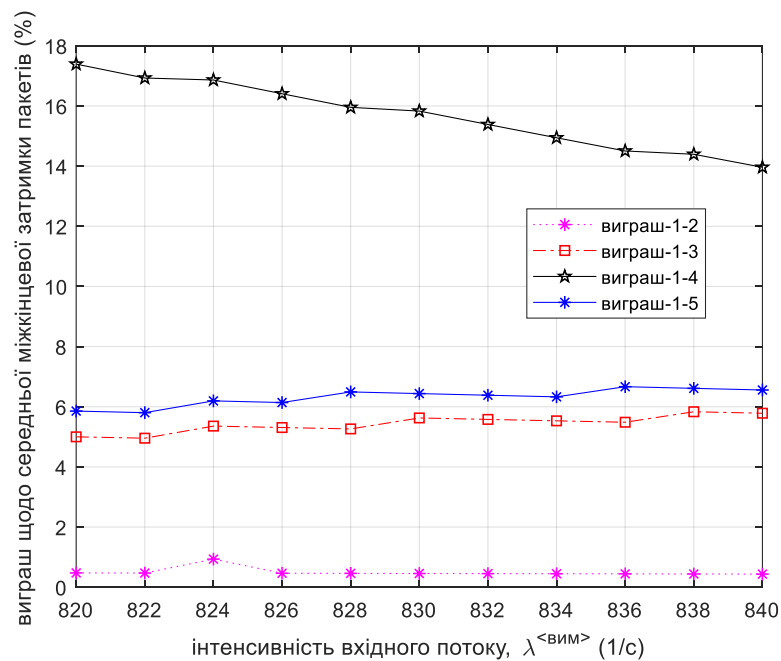


Рис. 2.15. Залежності середньої міжкінцевої затримки пакетів  $\tau_{MP}$  (2.51) від інтенсивності вхідного потоку пакетів  $\lambda^{<v_{им}>}$  для п'яти порівнюваних моделей маршрутизації (другий варіант структури



ТКМ)

Рис. 2.16. Виграш за середньою міжкінцевою затримкою пакетів від застосування запропонованої моделі (model 1) порівняно з іншими моделями маршрутизації залежно від інтенсивності вхідного потоку пакетів  $\lambda^{<v_{им}>}$

(другий варіант структури ТКМ)



Як показали результати розрахунків (рис. 2.15) для другого варіанта структури ТКМ (рис. 2.14), застосування запропонованої тензорної моделі маршрутизації дозволяє отримати такий вигреш за середньою міжкінцевою затримкою пакетів в області високих навантажень (рис. 2.16):

- порівняно з model 4 в середньому від 14 % до 17,5 %;
- порівняно з model 3 та 5 – від 5 % до 6,5 %;
- порівняно з model 2 – від 0,5 % до 1 %.

Третій варіант структури досліджуваної ТКМ зображено на рис. 2.17. ТКМ містила 9 маршрутизаторів та 12 каналів зв'язку. Позначення на рис. 2.17 аналогічні до рис. 2.6. Джерелом пакетів був перший маршрутизатор, а отримувачем пакетів – дев'ятий маршрутизатор. Робота кожного з інтерфейсів маршрутизаторів знову моделювалася системою масового обслуговування М/М/1/Н, де  $N = 50$ .

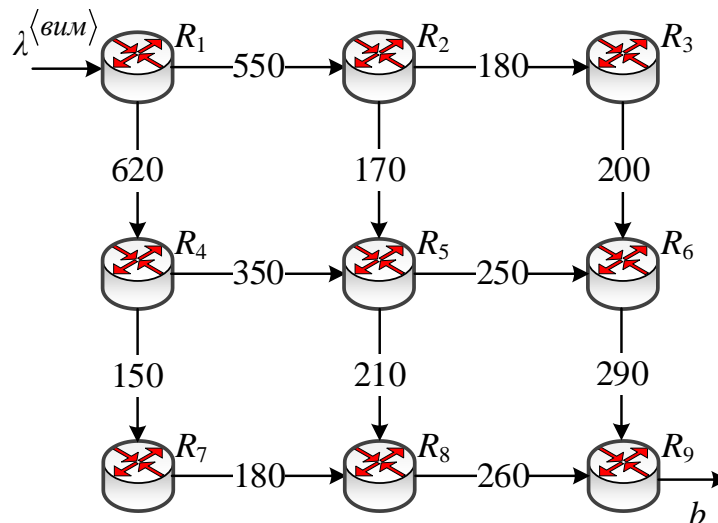


Рис. 2.17. Приклад третього варіанта структури ТКМ, яка підлягала дослідженню

Як вихідні використовувалися такі дані:

$$\lambda^{(вим)} = 10 \div 485 \text{ 1/с}; \quad \tau_{\langle don \rangle} = 80 \text{ мс}; \quad P_{\langle don \rangle} = 0,03. \quad (2.83)$$

Дослідженню знову підлягали ті самі п'ять моделей маршрутизації. На рис. 2.18 показано область високого навантаження на ТКМ, коли  $\lambda^{\langle \text{вим} \rangle} = 440 \div 485$  1/с, оскільки саме в цьому випадку вже спостерігалися втрати пакетів, але вони не перевищували встановлені допуски, тобто  $p_0 \leq 0,03$ .

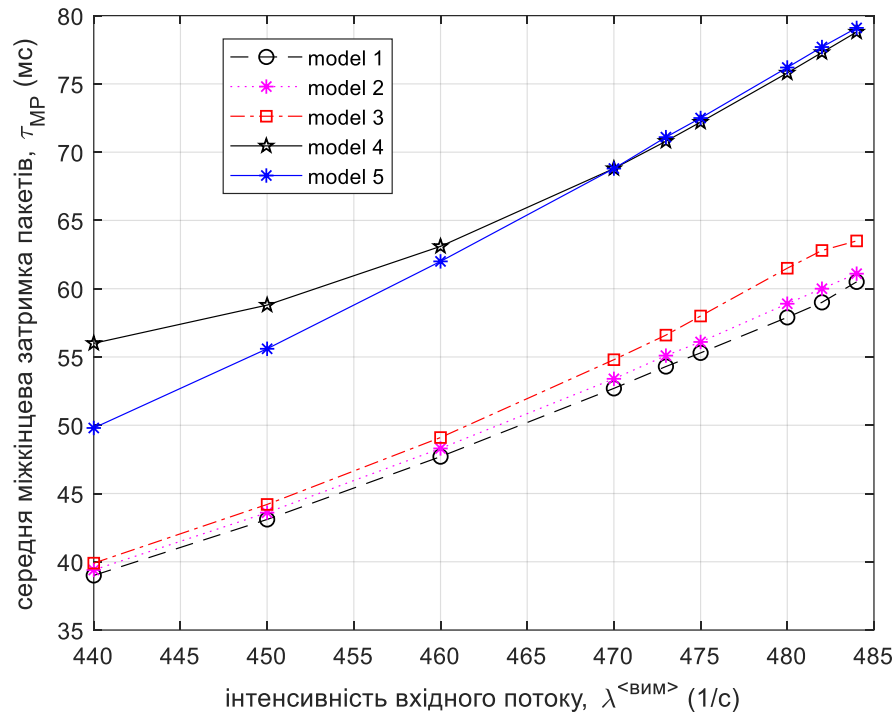


Рис. 2.18. Залежності середньої міжкінцевої затримки пакетів  $\tau_{MP}$  (2.51) від інтенсивності вхідного потоку пакетів  $\lambda^{\langle \text{вим} \rangle}$  для п'яти порівнюваних моделей маршрутизації (третій варіант структури ТКМ)

Як показали результати розрахунків (рис. 2.18) для третього варіанта структури ТКМ (рис. 2.17), застосування запропонованої тензорної моделі маршрутизації дозволяє отримати такий вигравш за середньою міжкінцевою затримкою пакетів в області високих навантажень (рис. 2.19):

- порівняно з model 5 в середньому від 22 % до 24 %;
- порівняно з model 4 – від 23 % до 30 %;
- порівняно з model 3 – від 3 % до 6 %;
- порівняно з model 2 – від 1 % до 35 %.

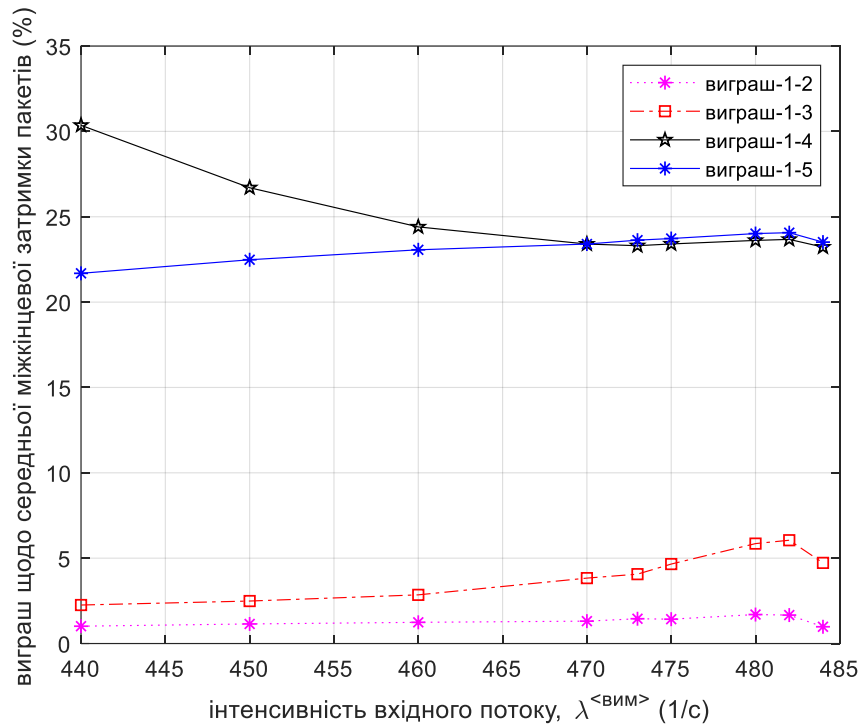


Рис. 2.19. Виграш за середньою міжкінцевою затримкою пакетів від застосування запропонованої моделі (model 1) порівняно з іншими моделями маршрутизації залежно від інтенсивності вхідного потоку пакетів  $\lambda^{\langle \text{вим} \rangle}$  (третій варіант структури ТКМ)

У додатку Б.1 наведено результати дослідження запропонованої тензорної моделі QoS-маршрутизації на прикладі структури ТКМ, аналогічної до структури, зображеної на рис. 2.17. Розглядався варіант без урахування втрат пакетів, коли робота інтерфейсів маршрутизаторів моделювалася СМО М/М/1, тобто буфер черг мав необмежену ємність. Результати моделювання також підтвердили ефективність запропонованих маршрутних рішень. Використання моделі (model 1) дозволяло знизити середню міжкінцеву затримку пакетів від 3 % до 50 % порівняно з model 4 та від 11 % до 30 % порівняно з model 5.

Четвертий досліджуваний варіант структури ТКМ представлено на рис. 2.20. ТКМ містила 12 маршрутизаторів та 17 каналів зв'язку. Позначення на рис. 2.20 аналогічні до рис. 2.6. Джерелом пакетів був перший маршрутизатор, а отримувачем пакетів – дванадцятий маршрутизатор. Робота

кожного з інтерфейсів маршрутизаторів знову моделювалася системою масового обслуговування  $M/M/1/N$ , де  $N = 25$ .

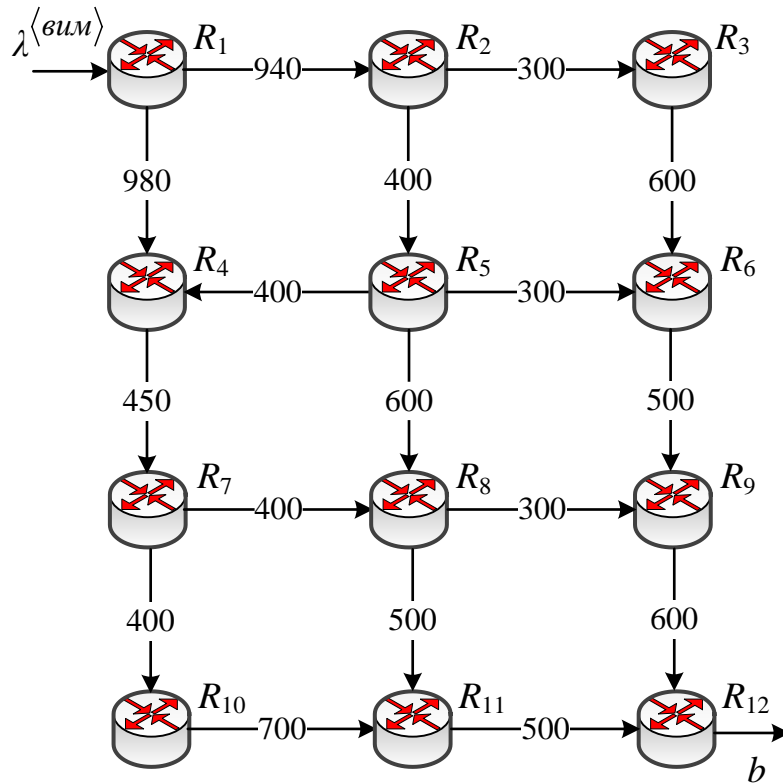


Рис. 2.20. Приклад четвертого досліджуваного варіанта структури ТКМ

Як вихідні використовувалися такі дані:

$$\lambda^{\langle \text{вим} \rangle} = 10 \div 980 \text{ 1/с}; \quad \tau_{\langle \text{дон} \rangle} = 100 \text{ мс}; \quad p_{\langle \text{дон} \rangle} = 0,01. \quad (2.84)$$

Порівнювалась ефективність тих самих п'яти моделей маршрутизації. На рис. 2.21 та 2.22 показано область високого навантаження на ТКМ, коли  $\lambda^{\langle \text{вим} \rangle} = 900 \div 980 \text{ 1/с}$ , а рівень втрат пакетів не перевищував установлені допуски, тобто  $p_{\partial} \leq 0,01$ .

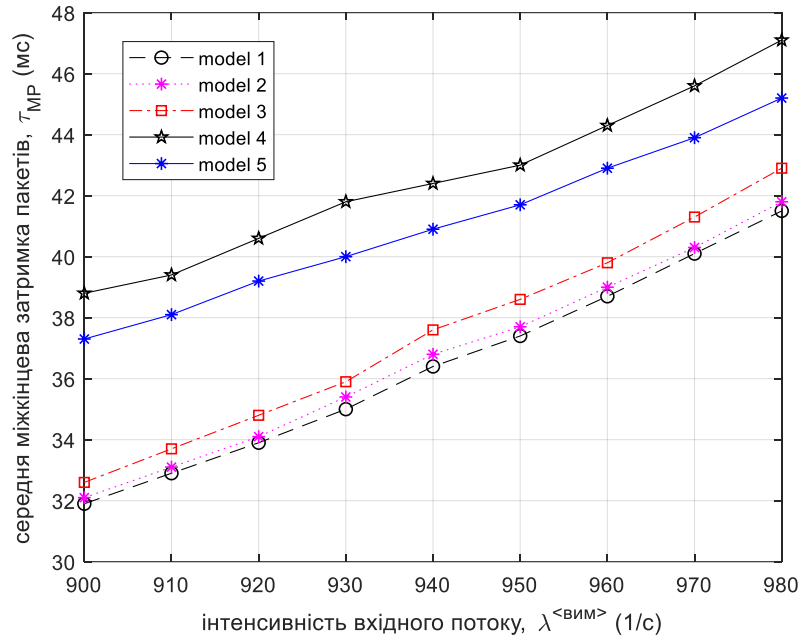


Рис. 2.21. Залежності середньої міжкінцевої затримки пакетів  $\tau_{MP}$  (2.51) від інтенсивності вхідного потоку пакетів  $\lambda^{<вим>}$  для п'яти порівнюваних моделей маршрутизації (четвертий варіант структури ТКМ)

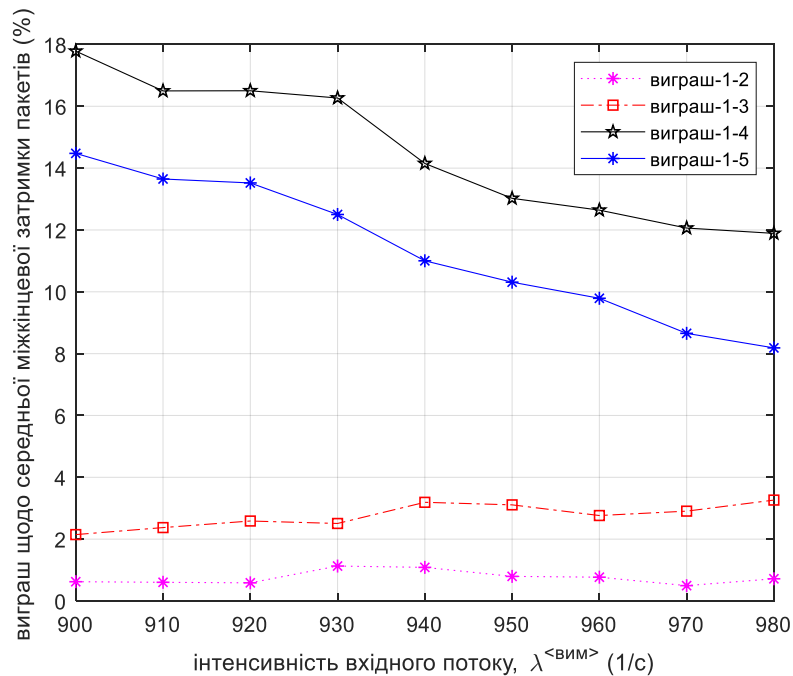


Рис. 2.22. Виграш за середньою міжкінцевою затримкою пакетів від застосування запропонованої моделі (model 1) порівняно з іншими моделями маршрутизації залежно від інтенсивності вхідного потоку пакетів  $\lambda^{<вим>}$  (четвертий варіант структури ТКМ)

Як показали результати розрахунків (рис. 2.21) для четвертого варіанта структури ТКМ (рис. 2.20), застосування запропонованої тензорної моделі маршрутизації дозволяє отримати такий вигаш за середньою міжкінцевою затримкою пакетів в області високих навантажень (рис. 2.22):

- порівняно з model 5 в середньому від 8 % до 15 %;
- порівняно з model 4 – від 12 % до 18 %;
- порівняно з model 3 – від 2 % до 3 %;
- порівняно з model 2 – від 1 % до 1,5 %.

## **2.7. Висновки до другого розділу**

1. У розділі проаналізовано основні принципи побудови тензорних моделей телекомунікаційних мереж, які основані, по-перше, на геометризації їхньої структурно-функціональної побудови з уведенням на структурі мережі дискретного геометричного простору та систем координат (базисів); по-друге, на метризації геометричного простору з визначенням адекватних метрик, що враховують основні параметри ТКМ, характеристики мережного трафіку та дисципліни обслуговування пакетів на вузлах мережі; по-третє, на описі кожного з потоків трафіку двовалентним змішаним тензором (2.4).

2. Проаналізовано відомі підходи до формулювання умов забезпечення якості обслуговування із застосуванням тензорних моделей ТКМ, які відрізнялися типом метрики введеного геометричного простору та множиною систем координат, що використовувалися в процесі тензорного моделювання. Установлено основні переваги та недоліки проаналізованих рішень та особливості їхнього використання для розв'язання мережних задач щодо управління трафіком та маршрутизації.

3. Удосконалено тензорну модель телекомунікаційної мережі, яку представлено в базисі міжполюсних шляхів і внутрішніх вузлових пар. Новизною запропонованого рішення є отримання умов забезпечення якості обслуговування за показниками мережної продуктивності: пропускної

здатності, середньої міжкінцевої затримки та ймовірності втрат пакетів (2.36), (2.59)–(2.62), які, на відміну від відомих, є справедливими для різних режимів завантаженості мережі, а не тільки для режиму, близькому до перевантаження, та не потребують задіяння всіх доступних каналів зв'язку та маршрутів ТКМ. Застосування вдосконаленої тензорної моделі ТКМ для розв'язання задач маршрутизації дозволяє підвищити рівень якості обслуговування, знизивши середню міжкінцеву затримку пакетів, та за необхідності забезпечити адаптивний характер використання каналів та шляхів ТКМ у процесі реалізації як одношляхової, так і багатошляхової маршрутизації.

4. Формулювання шуканих умов забезпечення якості обслуговування за показниками мережної продуктивності (2.36), (2.59)–(2.62) ґрунтується на отриманні аналітичних виразів для розрахунку середньої міжкінцевої затримки пакетів у мережі (2.58) та ймовірності втрат пакетів, у яких адекватно враховується топологія мережі, характеристики трафіку та дисциплін обслуговування пакетів на вузлах ТКМ, зокрема в умовах перевантаження мережних інтерфейсів. Отримання таких виразів, як буде показано в четвертому розділі, є важливим кроком на шляху формулювання умов забезпечення якості обслуговування, яка сприймається на рівні користувача (QoE), оскільки показники мультимедійної якості є функцією від перелічених показників мережної продуктивності.

5. У розділі запропонована система критеріїв оптимальності маршрутних рішень (2.75)–(2.80), які можуть використовуватися для розрахунку оптимальних значень маршрутних змінних. Ці критерії залежно від особливостей постановки задачі маршрутизації орієнтують на оптимальне використання доступного мережного ресурсу та/або на диференційоване покращення QoS-показників мережної продуктивності, до числових значень яких чутливий той чи інший потік пакетів.

6. Проведено аналіз впливу виду критерію оптимальності на характер рішень задач QoS-маршрутизації з використанням запропонованої тензорної моделі телекомунікаційної мережі. На низці розрахункових прикладів

удосконалена тензорна модель ТКМ як на рівні запропонованих QoS-умов (2.59) і (2.73), так і розглянутих QoS-критеріїв оптимальності (2.78) і (2.79), підтвердила свою адекватність у розв'язанні задач одно- та багатошляхової маршрутизації. Удосконалена тензорна модель ТКМ забезпечувала адаптивне реагування на зміну завантаженості мережі та виду критерію оптимальності маршрутних рішень з точки зору забезпечення заданих значень показників якості обслуговування – швидкості передачі ( $\lambda^{(вим)}$ ), середньої міжкінцевої затримки ( $\tau_{\langle don \rangle}$ ) та ймовірності втрат пакетів ( $p_{\langle don \rangle}$ ).

7. Проведено дослідження та порівняльний аналіз запропонованої тензорної моделі ТКМ з іншими відомими моделями розв'язання задач маршрутизації. Залежно від обраної мережної топології застосування запропонованої тензорної моделі маршрутизації дозволяє зменшити середню міжкінцеву затримку пакетів в області високих навантажень (рис. 2.13, 2.16, 2.19 та 2.33). Так, наприклад, порівняно з математичними моделями, основаними на маршрутних метриках, вигреш становив від 6–12 % до 18–30 %; порівняно з рішеннями Traffic Engineering – від 5–8 % до 21,5–24 %. Порівняно з відомою тензорною моделлю, представленою у базисі контурів та вузлових пар, вдалося знизити середню міжкінцеву затримку пакетів лише від 1 % до 3 %, але значно розширивши область застосування тензорних рішень:

- на весь діапазон навантажень в ТКМ – від низьких до критичних (близьких до перевантаження);

- на одношляхову та багатошляхову стратегії маршрутизації з адаптивним регулюванням кількості використаних маршрутів (залежності від рівня QoS-вимог).



### РОЗДІЛ 3

## МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ШВИДКОЇ ПЕРЕМАРШРУТИЗАЦІЇ ІЗ ЗАХИСТОМ РІВНЯ ЯКОСТІ ОБСЛУГОВУВАННЯ ЗА МНОЖИНОЮ ПОКАЗНИКІВ МЕРЕЖНОЇ ПРОДУКТИВНОСТІ

Важливою тенденцією в розвитку засобів відмовостійкої маршрутизації є забезпечення захисту (резервування) як структурних елементів мережі (каналу/вузла/шляху), так і її функціональних характеристик, які, як правило, представлені показниками якості обслуговування. Проте, як показано в першому розділі (рис. 1.4), усе більше додатків, окрім пропускної здатності, є чутливими й до інших показників мережної продуктивності, наприклад, часових QoS-показників (середньої затримки, джитеру пакетів) та показників надійності (імовірності втрат пакетів). Тому для створення високонадійних ТКМ необхідно, щоб протоколи відмовостійкої маршрутизації розширили свій функціонал у бік забезпечення захисту рівня якості обслуговування за множиною показників мережної продуктивності, що неможливо зробити без кардинального перегляду математичних моделей та методів, на яких мають базуватися ці протоколи.

У розділі пропонується система математичних моделей швидкої перемаршрутизації в ТКМ із захистом якості обслуговування за множиною показників мережної продуктивності. Залежно від типу контенту, який передається в мережі, захисту підлягатимуть різні комбінації QoS-показників. Так, передаючи трафік даних у процесі швидкої перемаршрутизації, варто забезпечити захист двох основних показників мережної продуктивності – пропускної здатності мережі та ймовірності втрат пакетів. Проте під час обслуговування мультимедійного трафіка будуть гарантуватися задані значення більш широкої множини QoS-показників – пропускної здатності, середньої міжкінцевої затримки та ймовірності втрат пакетів.

Матеріали розділу опубліковані в роботах [66, 69, 71, 77, 78, 80, 85, 86, 91–93, 104, 109–114, 116, 117, 119, 123, 127, 129, 130. –164].

### **3.1. Розроблення потокової моделі швидкої перемаршрутизації трафіка даних із захистом рівня якості обслуговування за показниками пропускної здатності та ймовірності втрат пакетів**

Відповідно до проведеного в першому розділі аналізу, на сьогодні надзвичайно актуальною є завдання, пов'язане з побудовою так званих відмовостійких мереж, здатних забезпечити високий рівень якості обслуговування та відмовостійкості [11–16, 18–22, 25–34]. Ґрунтуючись на результатах проведеного в першому розділі аналізу наявних і перспективних рішень щодо відмовостійкої маршрутизації, проведена класифікація перспективних схем захисту рівня якості обслуговування в телекомунікаційних мережах (табл. 1.10). Так, відповідно до табл. 1.10, у цьому підрозділі представлено реалізацію схеми QoS<sup>2</sup>-FRR-BL, яка передбачає розроблення математичної моделі швидкої перемаршрутизації трафіка даних із захистом рівня обслуговування в ТКМ за показниками пропускної здатності та ймовірності втрат пакетів.

#### **3.1.1. Базова потокова модель швидкої перемаршрутизації в телекомунікаційній мережі**

Нехай у розробленні моделі швидкої перемаршрутизації із захистом рівня якості обслуговування структура телекомунікаційної мережі описується аналогічно до умовних позначень, запропонованих у підрозділі 2.1.1. Варто зазначити, що для реалізації швидкої перемаршрутизації в ТКМ [60, 62, 66, 69, 150] необхідно забезпечити розрахунок не одного, а вже двох типів маршрутних змінних  $x_{i,j}^k$  і  $\bar{x}_{i,j}^k$ . Так, кожна зі змінних  $x_{i,j}^k$  буде характеризувати частку інтенсивності  $k$ -го потоку пакетів, що передається каналом зв'язку  $(i, j) \in V$ , який входить до основного шляху (мультишляху). Кожна з додатково введених керуючих змінних  $\bar{x}_{i,j}^k$  визначає частку

інтенсивності  $k$ -го потоку пакетів, які передаються каналом зв'язку  $(i, j) \in V$ , що входить вже до резервного шляху (мультишляху). Надалі під мультишляхом буде розумітися множина шляхів, які використовуються для передачі пакетів між заданою парою вузлів відправник-отримувач.

На введені керуючі змінні відповідно до їхнього фізичного змісту накладається низка обмежень. Так, у разі реалізації багатошляхової стратегії маршрутизації для розрахунку основного мультишляху на маршрутні змінні  $x_{i,j}^k$  накладаються умови (2.64), а для розрахунку резервного маршруту на змінні  $\bar{x}_{i,j}^k$  будуть накладатися аналогічні умови, що мають такий вигляд:

$$0 \leq \bar{x}_{i,j}^k \leq 1. \quad (3.1)$$

Для забезпечення узгодженості в розрахунку маршрутних змінних, що відповідають за реалізацію швидкої перемаршрутизації в мережі, важливо забезпечити виконання умов збереження потоку з урахуванням можливих втрат пакетів, викликаних перевантаженням буфера черг на маршрутизаторах мережі. Ці умови для вузлів, що входять до основного шляху (шляхів), представлені виразом (2.71), а обмеження аналогічні цим умовам, що накладаються на маршрутні змінні для резервного шляху:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{j:(i,j) \in V} \bar{x}_{i,j}^k = 1, \quad k \in K, \quad i = s_k; \\ \sum_{j:(i,j) \in V} \bar{x}_{i,j}^k - \sum_{j:(j,i) \in V} \bar{x}_{j,i}^k (1 - \bar{p}_{j,i}^k) = 0, \quad k \in K, \quad i \neq s_k, d_k; \\ \sum_{j:(j,i) \in V} \bar{x}_{j,i}^k (1 - \bar{p}_{i,j}^k) = \bar{b}^k, \quad k \in K, \quad i = d_k, \end{array} \right. \quad (3.2)$$

де  $\bar{b}^k$  – це частка інтенсивності  $k$ -го потоку, що обслуговується мережею за умови використання резервного шляху;

$\bar{p}_{i,j}^k$  – імовірність втрат пакетів  $k$ -го потоку на  $j$ -му інтерфейсі  $i$ -го вузла в процесі його використання резервним шляхом.

Як відомо, кожному типу трафіка та дисципліні обслуговування відповідає своя модель роботи інтерфейсу, представлена тією чи іншою системою масового обслуговування, наприклад, M/M/1/N, M/D/1/N тощо. У цьому розділі, як приклад, для визначення ймовірності втрат пакетів на перевантажених інтерфейсах маршрутизаторів мережі будуть використовуватися можливості системи масового обслуговування з відмовами типу M/M/1/N. Тоді ймовірності втрат пакетів на інтерфейсах маршрутизаторів уздовж основного шляху (шляхів) розраховуються за допомогою виразу (2.72), а вздовж резервного ( $\bar{p}_{i,j}^k$ ) шляху (шляхів) як

$$\bar{p}_{i,j}^k = \frac{(1 - \bar{\rho}_{i,j})(\bar{\rho}_{i,j})^N}{1 - (\bar{\rho}_{i,j})^{N+1}}, \quad (3.3)$$

де  $\bar{\rho}_{i,j} = \frac{\bar{\lambda}_{i,j}}{\varphi_{i,j}}$  – коефіцієнт завантаженості каналу зв'язку  $(i, j)$ , що входить до

резервного маршруту в процесі його використання  $k$ -м потоком пакетів.

Зокрема аналогічний коефіцієнт завантаженості каналу зв'язку  $(i, j)$ , що

входить до основного маршруту, за умови його використання  $k$ -м потоком  $\rho_{i,j}^k$

у виразі (2.72) буде розраховуватись, як  $\rho_{i,j}^k = \frac{\lambda_{i,j}}{\varphi_{i,j}}$ .

Інтенсивності агрегованих потоків, що надходять до каналу зв'язку  $(i, j)$  в процесі його використання основним або резервним маршрутом, відповідно  $\lambda_{i,j}$  та  $\bar{\lambda}_{i,j}$ , залежно від схеми переходу на резервні шляхи у випадку

множинних відмов визначають по-різному. Так, наприклад, якщо всі потоки одночасно (синхронно) перемикаються на резервні шляхи у випадку відмови хоча б одного елемента ТКМ, то мають місце такі вирази:

$$\begin{cases} \lambda_{i,j} = \sum_{k \in K} \lambda_k^{\langle \text{вим} \rangle} x_{i,j}^k; \\ \bar{\lambda}_{i,j} = \sum_{k \in K} \lambda_k^{\langle \text{вим} \rangle} \bar{x}_{i,j}^k. \end{cases} \quad (3.4)$$

Якщо ж на використання резервних шляхів перейдуть тільки ті потоки, що протікали через елемент мережі, який відмовив, то замість системи (3.4) треба використовувати таку систему:

$$\begin{cases} \lambda_{i,j} = \lambda_k^{\langle \text{вим} \rangle} x_{i,j}^k + \sum_{p \in K, p \neq k} \lambda_p^{\langle \text{вим} \rangle} \max[x_{i,j}^p, \bar{x}_{i,j}^p]; \\ \bar{\lambda}_{i,j} = \lambda_k^{\langle \text{вим} \rangle} \bar{x}_{i,j}^k + \sum_{p \in K, p \neq k} \lambda_p^{\langle \text{вим} \rangle} \max[x_{i,j}^p, \bar{x}_{i,j}^p]. \end{cases} \quad (3.5)$$

Фізичний зміст виразів (3.4) полягає в тому, що розрахунок коефіцієнтів завантаженості каналів, а разом з ним і такого показника якості обслуговування, як імовірність втрат пакетів (2.72), (3.3) буде проводитися для найгіршого випадку, з точки зору величини інтенсивності агрегованого потоку. Другий доданок у правій частині виразів (3.4) якраз і вводиться з цією метою: у визначенні інтенсивності агрегованого потоку враховується максимальне значення інтенсивності кожного  $k$ -го потоку пакетів у довільному каналі зв'язку  $(i, j)$  за умови його використання або основним, або резервним маршрутом.

Водночас можна зазначити, що для кожного окремого  $k$ -го потоку його інтенсивність пакетів, які надходять до каналу  $(i, j)$ , що належить основному або резервному шляху, визначається аналогічно (2.68) відповідними виразами

$$\lambda_{i,j}^k = \lambda_k^{\langle \text{вим} \rangle} x_{i,j}^k \quad \text{та} \quad \bar{\lambda}_{i,j}^k = \lambda_k^{\langle \text{вим} \rangle} \bar{x}_{i,j}^k. \quad (3.6)$$

Тоді інтенсивність втрачених пакетів  $k$ -го потоку на  $j$ -му інтерфейсі  $i$ -го вузла в разі його використання основним шляхом визначається за допомогою виразу (2.69), а у випадку застосування резервним шляхом відповідно буде визначатися як

$$\bar{r}_{i,j}^k = \lambda_k^{\langle \text{вим} \rangle} \bar{x}_{i,j}^k \bar{p}_{i,j}^k. \quad (3.7)$$

### 3.1.2. Формалізація умов забезпечення захисту каналу зв'язку, вузла, маршруту, пропускної здатності та ймовірності втрат пакетів за умов швидкої перемаршрутизації в телекомунікаційній мережі

Зважаючи на результати, отримані в роботах [69, 77, 80, 86], умови, що описують реалізацію схем захисту (резервування) мережних елементів та рівня якості обслуговування в мережі в процесі швидкої перемаршрутизації потоків пакетів будуть мати такий вигляд:

1. Умова захисту каналу зв'язку  $(i, j) \in V$ :

$$0 \leq \bar{x}_{i,j}^k \leq \delta_{i,j}^k, \quad (3.8)$$

де

$$\delta_{i,j}^k = \begin{cases} 0, & \text{у разі захисту каналу зв'язку } (i, j) \in V; \\ 1, & \text{в іншому випадку.} \end{cases}$$

2. Умови захисту вузла  $u_i \in U$  (при узагальненні умови (3.8) на випадок захисту множини каналів зв'язку, що є інцидентними вузлу, що захищається):

$$0 \leq \bar{x}_{i,j}^k \leq \delta_{i,j}^k, \text{ якщо } u_j \in u_i^*, j = \overline{1,m}, \quad (3.9)$$

де  $u_i^* = \{u_j : \exists(i,j) \in V; i \neq j\}$  – підмножина маршрутизаторів, які є суміжними для маршрутизатора  $u_i$ .

3. Універсальні умови захисту шляху, які справедливі й для одношляхової, і для багатошляхової маршрутизації, мають нелінійний вигляд:

$$\sum_{u_j \in u_i^*} \sum_{u_p \in u_i^*} x_{j,i}^k \bar{x}_{p,i}^k = 0, \forall u_i \in U \setminus \{s_k, d_k\}. \quad (3.10)$$

4. Умови реалізації схеми захисту пропускнуої здатності мережі, як основного QoS-показника, у процесі швидкої перемаршрутизації з урахуванням (3.4), (3.5) та можливих втрат пакетів на інтерфейсах маршрутизаторів [86]:

$$\lambda_{i,j} \leq \varphi_{i,j} \text{ та } \bar{\lambda}_{i,j} \leq \varphi_{i,j}, (i,j) \in V. \quad (3.11)$$

5. Умови захисту такого QoS-показника, як імовірність втрат пакетів  $k$ -го потоку в мережі, що, ґрунтуючись на моделі (3.1)–(3.5), мають такий вигляд [93, 109, 110]:

$$1 - b^k \leq p_{\langle \text{don} \rangle}^k; \quad (3.12)$$

$$1 - \bar{b}^k \leq p_{\langle \text{don} \rangle}^k, \quad (3.13)$$

де  $p_{\langle \text{дон} \rangle}^k$  – QoS-вимоги щодо гранично допустимих значень імовірності втрат пакетів  $k$ -го потоку в мережі (2.73).

### 3.1.3. Формалізація критерію оптимальності рішень задачі швидкої перемаршрутизації трафіка даних у телекомунікаційній мережі

У межах наведеної моделі пропонується представити задачу швидкої перемаршрутизації із захистом рівня QoS в оптимізаційній формі, де як критерій оптимальності отримуваних маршрутних рішень доцільно обрати умову, пов'язану з максимізацією загальної продуктивності телекомунікаційної мережі:

$$J = \sum_{k \in K} (c^k b^k + \bar{c}^k \bar{b}^k) \rightarrow \max, \quad (3.14)$$

де  $c^k$  і  $\bar{c}^k$  – вагові коефіцієнти, які характеризують важливість (пріоритетність)  $k$ -го потоку в мережі.

У цьому випадку, умова  $c^k > \bar{c}^k$  має виконуватися так, щоб рівень QoS для  $k$ -го потоку вздовж основного шляху був не гірший за рівень якості обслуговування для цього самого потоку вздовж резервного шляху.

Обмеженнями в ході розв'язання сформульованої оптимізаційної задачі (3.14) були умови реалізації багатошляхової стратегії маршрутизації (2.64), (3.1), умови збереження потоку (2.71), (3.2), умови захисту каналу, вузла, шляху (3.7)–(3.10), умови запобігання перевантаження каналів зв'язку – захисту пропускної здатності мережі (3.11), умови забезпечення захисту рівня якості обслуговування за показником імовірності втрат пакетів (3.12), (3.13).

Сформульована оптимізаційна задача належить до класу задач нелінійного програмування, оскільки переважна більшість обмежень,



наприклад (2.71), (3.2), (3.10) та (3.11), мають нелінійну залежність від керуючих (маршрутних) змінних.

### 3.2 Дослідження потокової моделі швидкої перемаршрутизації трафіка даних із захистом рівня якості обслуговування за показниками пропускної здатності та ймовірності втрат пакетів

Особливості використання моделі швидкої перемаршрутизації (2.64), (2.69), (2.71), (2.72), (3.1)–(3.14) будуть продемонстровані на прикладі структури телекомунікаційної мережі, показаної на рис. 3.1. Мережа складалася із 16 маршрутизаторів (R1÷R16) та 24 каналів зв'язку. До того ж робота кожного з інтерфейсів маршрутизаторів ТКМ моделювалася системою масового обслуговування M/M/1/N, а ємність буфера становила 30 пакетів. На рис. 3.1 у розривах каналів зв'язку показана їхня пропускна здатність  $\varphi_{i,j}$  (1/с).

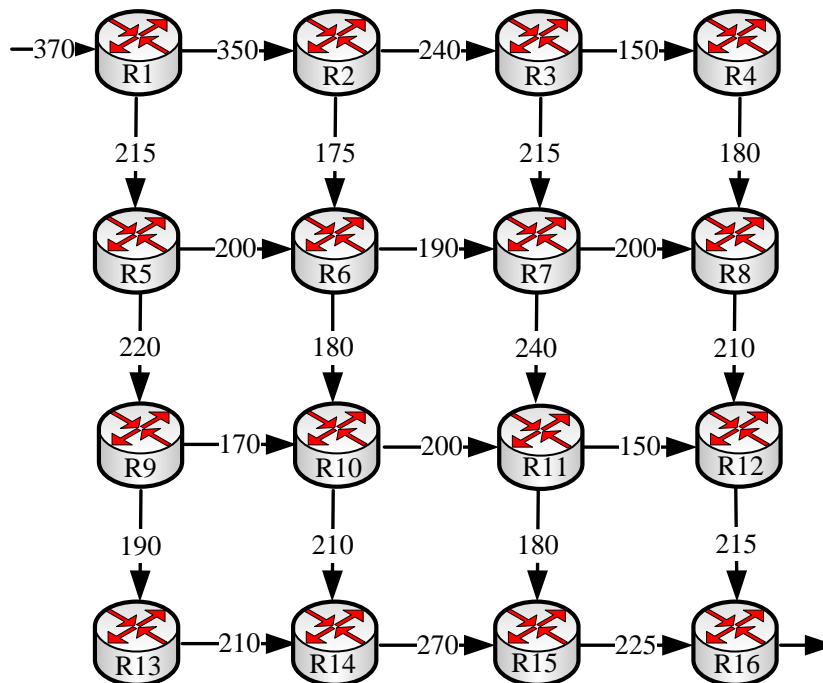


Рис. 3.1. Структура досліджуваної телекомунікаційної мережі

Припустимо, що до мережі на маршрутизатор R1 надходить потік пакетів, які необхідно передати на маршрутизатор R16 (рис. 3.1). Вимоги до рівня якості обслуговування представлені інтенсивністю потоку  $\lambda_k^{(вим)} = 370$  1/с, а також величиною допустимої ймовірності втрат пакетів у мережі  $P_{\langle доп \rangle}^k = 10^{-3}$ . Наприклад, нехай у процесі швидкої перемаршрутизації необхідно забезпечити захист:

- вузла R10 та, відповідно, інцидентних йому каналів зв'язку (рис. 3.2);
- рівня якості обслуговування за обраними двома QoS-показниками ( $\lambda_k^{(вим)}$  та  $P_{\langle доп \rangle}^k$ ).

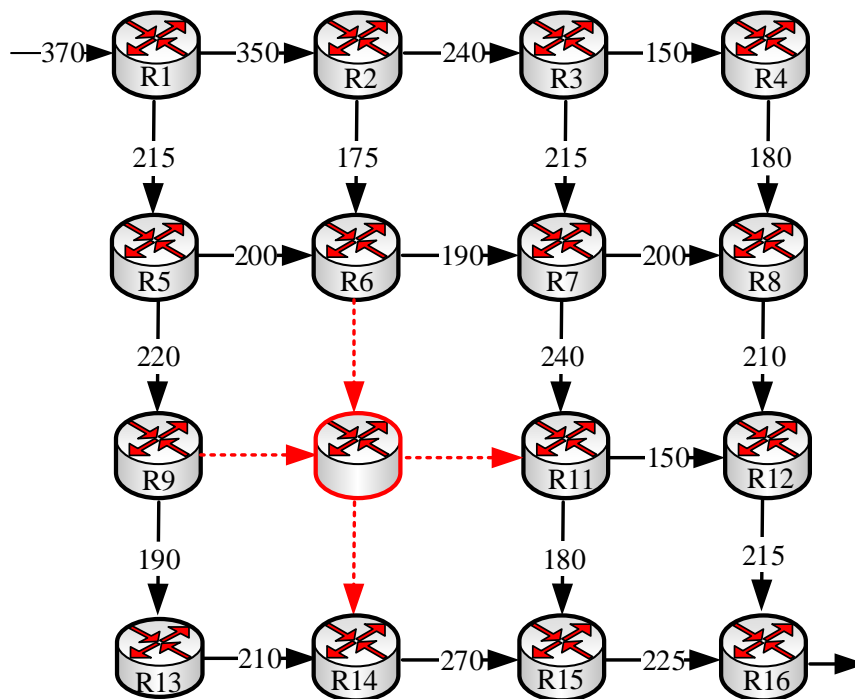


Рис. 3.2. Структура досліджуваної телекомунікаційної мережі під час захисту маршрутизатора R10 та інцидентних йому каналів зв'язку

Для наочності всі вихідні дані для розрахунку представлені в табл. 3.1.

**Вихідні дані для проведення дослідження запропонованої моделі швидкої перемаршрутизації**

Тип розробленої моделі за схемою	Пропускна здатність	Імовірність втрат пакетів	Елементи, що захищаються	
	$\lambda_k^{\langle \text{вим} \rangle}, (1/\text{с})$	$P_{\langle \text{дон} \rangle}^k$	Вузли	Канали зв'язку
QoS <sup>2</sup> -FRR-BL	370	$10^{-3}$	R10	(6,10), (9,10), (10,11), (10,14)

У ході розв'язання задачі швидкої перемаршрутизації з використанням запропонованої моделі (2.64), (2.69), (2.71), (2.72), (3.1)–(3.14) було розраховано основний (рис. 3.3) та резервний (рис. 3.4) мультишляхи, водночас резервний не містив вузол R10, який захищався. Уздовж основного та резервного шляхів виконувалися вимоги щодо якості обслуговування, як за пропускнуою здатністю, так і за ймовірністю втрат пакетів відповідно до умов (3.11)–(3.13).

На рис. 3.3 та 3.4 над каналами зв'язку зазначені результати розрахунків, представлені у вигляді дроби, де в чисельнику приведена інтенсивність потоку пакетів (1/с), а в знаменнику – пропускна здатність цього каналу (1/с). Крім того, окремими стрілками, що виходять з таких вузлів, як R1, R12 та R15 (рис. 3.3) та R1, R7-R9, R12 і R15 (рис. 3.4), показано інтенсивності втрат пакетів на відповідних інтерфейсах цих маршрутизаторів.

Для наочності та оцінки адекватності отриманих рішень усі результати дослідження зведені в табл. 3.2. Вимоги щодо значень показників якості обслуговування виконувались як уздовж основного, так і вздовж резервного мультишляхів. У цьому разі ймовірність втрат пакетів у мережі за умови використання основного мультишляху становила  $8,84 \times 10^{-4}$ , а для резервного –  $8,8815 \times 10^{-4}$ .

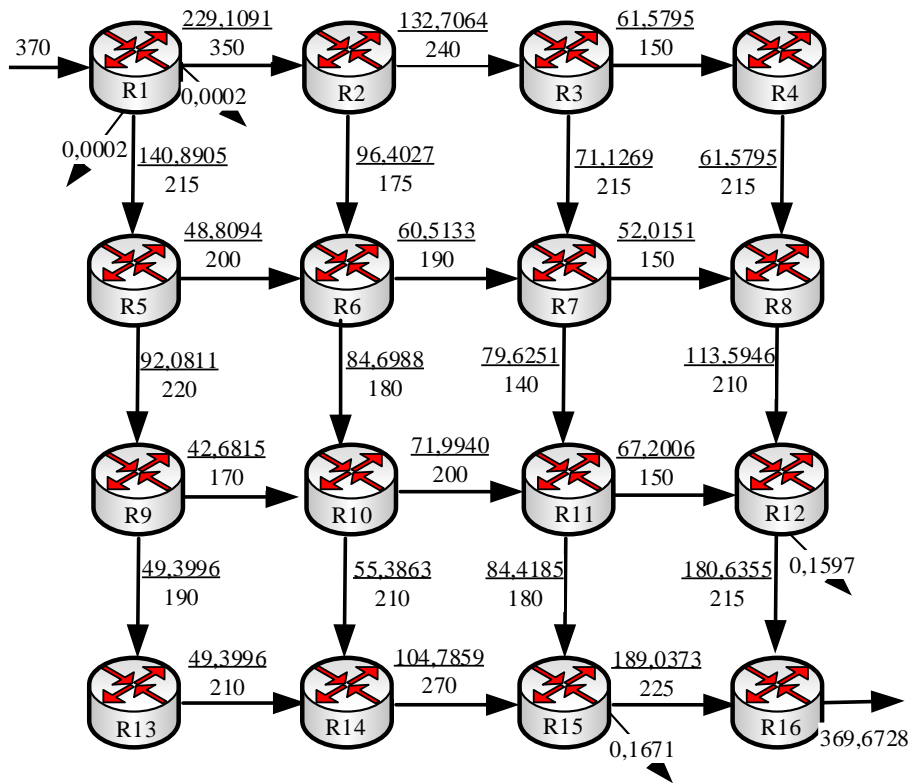


Рис. 3.3. Порядок маршрутизації потоку пакетів, що передаються основним мультит шляхом

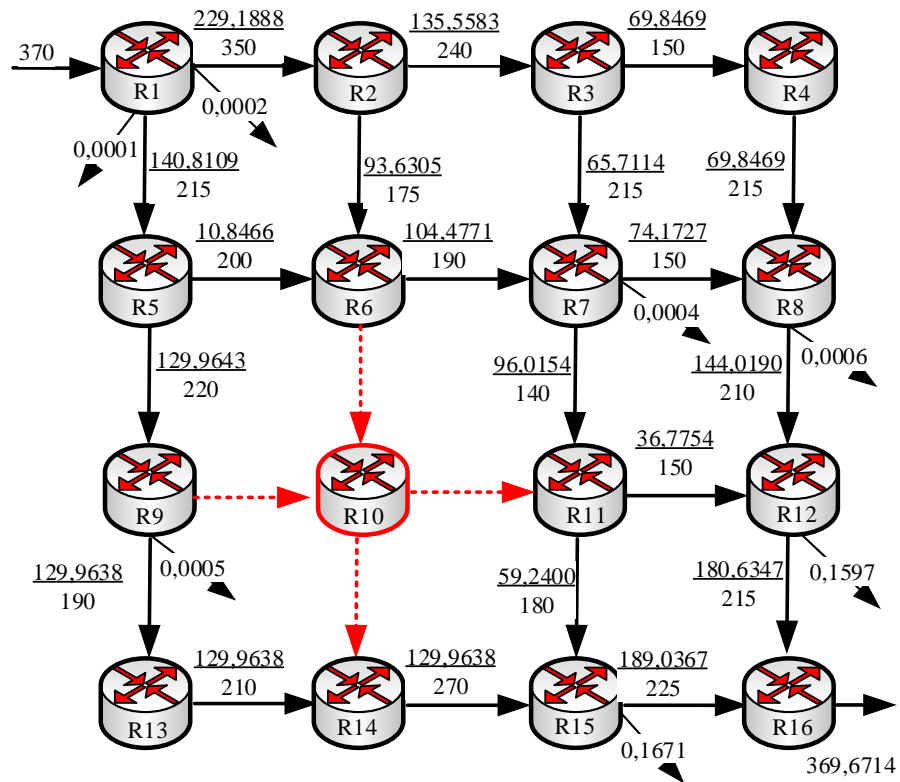


Рис. 3.4. Порядок маршрутизації потоку пакетів, що передаються резервним мультит шляхом

**Порядок маршрутизації потоку пакетів, які передаються основним та резервним мультишляхами**

Канал зв'язку	Пропускна здатність каналу зв'язку, 1/с	Результати розрахунків для основного мультишляху		Результати розрахунків для резервного мультишляху	
		Інтенсивність передачі пакетів ( $\lambda_{i,j}^k$ ), 1/с	Інтенсивність потоку втрачених пакетів ( $r_{i,j}^k$ ), 1/с	Інтенсивність передачі пакетів ( $\bar{\lambda}_{i,j}^k$ ), 1/с	Інтенсивність потоку втрачених пакетів ( $\bar{r}_{i,j}^k$ ), 1/с
(1,2)	350	229,1091	0,0002	229,1888	0,0002
(1,5)	215	140,8905	0,0002	140,8109	0,0001
(2,3)	240	132,7064	0	135,5583	0
(2,6)	175	96,4027	0	93,6305	0
(3,4)	150	61,5795	0	69,8469	0
(3,7)	215	71,1269	0	65,7114	0
(4,8)	215	61,5795	0	69,8469	0
(5,6)	200	48,8094	0	10,8466	0
(5,9)	220	92,0811	0	129,9643	0
(6,7)	190	60,5133	0	104,4771	0
(6,10)	180	84,6988	0	0	0
(7,8)	150	52,0151	0	74,1727	0
(7,11)	140	79,6251	0	96,0154	0,0004
(8,12)	210	113,5946	0	144,0190	0,0006
(9,10)	170	42,6815	0	0	0
(9,13)	190	49,3996	0	129,9638	0,0005
(10,11)	200	71,9940	0	0	0
(10,14)	210	55,3863	0	0	0
(11,12)	150	67,2006	0	36,7754	0
(11,15)	180	84,4185	0	59,2400	0
(12,16)	215	180,6355	0,1597	180,6347	0,1597
(13,14)	210	49,3996	0	129,9638	0
(14,15)	270	104,7859	0	129,9638	0
(15,16)	225	189,0373	0,1671	189,0367	0,1671

Отже, відповідно до результатів, отриманих за допомогою розробленої моделі (2.64), (2.69), (2.71), (2.72), (3.1)–(3.14), розв'язано задачу швидкої перемаршрутизації, у межах якої забезпечувався захист вузла R10 та заданого рівня QoS за показниками пропускної здатності ( $\lambda_k^{\langle \text{вим} \rangle} = 370$  1/с) та

ймовірності втрат пакетів ( $P_{\langle \text{don} \rangle}^k = 10^{-3}$ ). Здобуті результати підтвердили адекватність та працездатність запропонованої потокової моделі швидкої перемаршрутизації із забезпеченням якості обслуговування за показниками пропускної здатності та ймовірності втрат пакетів. Запропонована модель орієнтована на застосування в умовах швидкої перемаршрутизації трафіка даних, який є чутливим до числових значень саме цих QoS-показників.

### **3.3. Розроблення системи тензорних моделей швидкої перемаршрутизації із захистом рівня якості обслуговування за множиною показників мережної продуктивності**

Для подальшого розроблення комплексного рішення щодо забезпечення якості обслуговування в умовах реалізації стратегії швидкої перемаршрутизації, наступний науковий результат спрямований на забезпечення якості обслуговування вже за трьома показниками мережної продуктивності: пропускна здатність, середня затримка та ймовірність втрат пакетів – відповідно до запропонованої схеми QoS<sup>3</sup>-FRR-BDL (табл. 1.10). Ґрунтуючись на аналізі робіт [150, 271, 273, 308], представленому в першому розділі, у розробленні такої системи математичних моделей для забезпечення схеми захисту рівня якості обслуговування QoS<sup>3</sup>-FRR-BDL використовувався тензорний підхід як один з ефективних засобів цілісного та багатоаспектного опису телекомунікаційної мережі в розв’язанні задач відмовостійкої QoS-маршрутизації. Це обґрунтовано тим, що саме завдяки тензорним формалізмам, як показано в другому розділі, з’являється можливість отримати аналітичні залежності для розрахунку показників мережної продуктивності – середньої міжкінцевої затримки та ймовірності втрат пакетів, що є функціями від параметрів мережі, характеристиками трафіка та, як головне, маршрутних змінних.

### 3.3.1. Тензорна модель швидкої перемаршрутизації в телекомунікаційній мережі, яка представлена в базисі контурів та вузлових пар

У цьому підрозділі для розроблення тензорної моделі швидкої перемаршрутизації із захистом рівня якості обслуговування за трьома показникам мережної продуктивності (QoS<sup>3</sup>-BDL-FRR): пропускна здатність, середня затримка та ймовірність втрат пакетів – як базову використаємо потокову модель, представлену виразами (2.64)–(2.74) та (3.1)–(3.14).

У межах базової тензорної моделі для реалізації швидкої перемаршрутизації в ТКМ [60, 62, 66, 69, 150], аналогічно до змісту розділу 3.1, необхідно також забезпечити розрахунок двох типів маршрутних змінних  $x_{i,j}^k$  і  $\bar{x}_{i,j}^k$ , кожна з яких характеризує частку інтенсивності  $k$ -го потоку пакетів, що протікає в каналі  $(i, j)$ , який входить до основного або резервного шляху (мультишляху) відповідно.

У процесі реалізації багатошляхової стратегії маршрутизації на зазначені маршрутні змінні накладаються обмеження, представлені виразами (2.64) та (3.1). Як умови збереження потоку на маршрутизаторах мережі, що входять до основного та резервного шляхів, використаємо вирази (2.71) та (3.2) відповідно, які також дозволяють врахувати можливі втрати пакетів, викликані перевантаженням буфера черг.

Тоді для визначення ймовірності  $p_{i,j}^k$  і  $\bar{p}_{i,j}^k$  втрат пакетів  $k$ -го потоку на  $j$ -му інтерфейсі  $i$ -го вузла, за умови застосування основного та резервного маршруту відповідно, буде також використовуватися, для прикладу, система масового обслуговування з відмовами виду M/M/1/N. Тоді ймовірності втрат пакетів на інтерфейсах вузлів основного ( $p_{i,j}^k$ ) і резервного ( $\bar{p}_{i,j}^k$ ) маршрутів можуть бути розраховані за допомогою виразів (2.72) та (3.3).

Для формалізації умов забезпечення захисту такого важливого практично для всіх типів трафіка QoS-показника, як середня міжкінцева затримка пакетів,

доцільно використати результати, отримані в другому розділі цієї роботи та пов'язані із застосуванням функціоналу тензорного моделювання процесів маршрутизації [77, 82, 83, 85, 104, 120]. Залежно від множини систем координат, у яких буде описуватися ТКМ як тензорний об'єкт, умови забезпечення захисту рівня якості обслуговування будуть дещо відрізнятися.

Так наприклад, під час введення на структурі ТКМ та використанні систем координат незалежних контурів та вузлових пар умови забезпечення якості обслуговування за показниками мережної продуктивності вздовж основних шляхів будуть мати форму (2.38), коли  $\lambda_{\eta}^1 = b^k$ , а для розрахунку координат метричного тензора (2.32) враховуються потоки, що протікають як за основними, так і за резервними шляхами, наприклад (3.5), тобто

$$\lambda_{i,j} = \lambda_k^{(eum)} x_{i,j}^k + \sum_{p \in K, p \neq k} \lambda_p^{(eum)} \max[x_{i,j}^p, \bar{x}_{i,j}^p].$$

Для отримання подібних до (2.38) QoS-умов, які були б справедливими вздовж резервних шляхів, необхідно ввести до розгляду одновимірну мережу  $\bar{S}$ , структура якої визначає дискретний  $\bar{n}$ -вимірним простір, де  $\bar{n}$  – число каналів зв'язку в мережі за винятком тих каналів, що підлягають резервуванню (захисту) в ході реалізації схем захисту вузлів та каналів зв'язку. Саме на рівні геометризації топології ТКМ забезпечується захист структурних елементів мережі – її каналів та вузлів. У цьому випадку під час реалізації швидкої перемаршрутизації тензорна модель мережі (2.4), (2.6) розглядатиметься в таких системах координат:

– система координат гілок мережі  $\{\bar{v}_z, z = \overline{1, \bar{n}}\}$ , у якій проекції тензора будуть позначатися індексом  $v$ ;

– система координат контурів  $\{\bar{\pi}_i, i = \overline{1, \bar{\mu}}\}$  та вузлових пар  $\{\bar{\eta}_j, j = \overline{1, \bar{\phi}}\}$  мережі, у якій проекції тензора будуть позначатися індексом  $\pi$ .



Тоді матимуть місце такі співвідношення:

$$\bar{\mu}(\bar{S}) = \bar{n} - \bar{m} + 1, \quad \bar{\phi}(\bar{S}) = \bar{m} - 1, \quad (3.15)$$

які визначають кількість базисних контурів та вузлових пар у мережі  $\bar{S}$  у разі використання в ході швидкої перемаршрутизації резервного мультишляху.

Тоді умови забезпечення якості обслуговування за показниками мережної продуктивності вздовж резервних шляхів, зберігаючи аналогічний до (2.38) геометричний та фізичний зміст, будуть мати такий вигляд:

$$\lambda^{\langle \text{вум} \rangle} \bar{b}^k \leq \bar{G}_{\pi\eta}^{\langle 4,2 \rangle} \left[ \bar{G}_{\pi\eta}^{\langle 4,4 \rangle} \right]^{-1} \bar{\Lambda}_{\eta-1} + \left( \bar{G}_{\pi\eta}^{\langle 4,1 \rangle} - \bar{G}_{\pi\eta}^{\langle 4,2 \rangle} \left[ \bar{G}_{\pi\eta}^{\langle 4,4 \rangle} \right]^{-1} \bar{G}_{\pi\eta}^{\langle 4,3 \rangle} \right) \tau_{\langle \text{дон} \rangle}^k, \quad (3.16)$$

за умови

$$\bar{T}_{\pi} = 0. \quad (3.17)$$

Метрика введеного простору, наприклад, у випадку моделювання роботи інтерфейсу СМО М/М/1/Н [313], має такий вигляд:

$$\bar{g}_v^{zz} = \frac{\bar{\lambda}_z (1 - \bar{\rho}_z^{N+1}) (1 - \bar{\rho}_z) \bar{\lambda}_v^z}{\bar{\rho}_z - \bar{\rho}_z^{N+2} - (N+1) \bar{\rho}_z^{N+1} (1 - \bar{\rho}_z)}, \quad (3.18)$$

забезпечуючи врахування потоків, що протікають як за основними, так і за резервними шляхами, наприклад (3.5), тобто

$$\bar{\lambda}_{i,j} = \lambda_k^{\langle \text{вум} \rangle} \bar{x}_{i,j}^k + \sum_{p \in K, p \neq k} \lambda_p^{\langle \text{вум} \rangle} \max[x_{i,j}^p, \bar{x}_{i,j}^p].$$

QoS-умови (2.38) та (3.16) враховують взаємний вплив показників мережної продуктивності (пропускної здатності, середньої міжкінцевої затримки та ймовірності втрат пакетів) один на одного. Їхнє виконання одночасно з (3.11)–(3.13) гарантує захист рівня якості обслуговування за цими показниками за умови швидкої перемаршрутизації у випадку відмов структурних елементів мережі – вузлів та каналів зв'язку.

Вимога щодо рівності нулю контурних затримок забезпечує однакову середню затримку пакетів для всіх шляхів, що розраховуються [86], сприяючи й мінімізації джитеру затримки, обумовленого реалізацією багатошляхової стратегії маршрутизації. Проте необхідність виконання обмежень (2.39) та (3.17) призводить унаслідок маршрутизації до використання всіх каналів зв'язку ТКМ, які визначають відповідні геометричні простори та системи координат. Тому умови (2.38) та (3.16) неможливо використовувати для реалізації схем захисту маршруту, оскільки вони не є сумісними з умовами (3.10).

Отже, у межах запропонованої тензорної моделі, представленої в базисі контурів та вузлових пар, задачу швидкої перемаршрутизації в телекомунікаційній мережі можна сформулювати в оптимізаційній формі. Критерієм оптимальності пропонується використовувати вираз (3.14), а обмеженнями на маршрутні змінні будуть умови реалізації багатошляхової маршрутизації (2.64) та (3.1), умови збереження потоку (2.71) і (3.2), умови відсутності контурів (2.39) та (3.17), а також умови захисту рівня якості обслуговування за множиною показників мережної продуктивності (3.11)–(3.13), (2.38) і (3.16). Сформульована задача також належить до класу задач нелінійного програмування та може бути розв'язана за допомогою відповідних оптимізаційних методів [255–261, 306–312, 314–324].

### 3.3.2. Тензорна модель швидкої перемаршрутизації в телекомунікаційній мережі, яка представлена в базисі міжполюсних шляхів і внутрішніх вузлових пар

У випадку використання в тензорному описі ТКМ систем координат незалежних міжполюсних шляхів і внутрішніх вузлових пар умови забезпечення якості обслуговування за показниками мережної продуктивності вздовж основних шляхів будуть мати форму (2.59). Для отримання подібних до (2.59) QoS-умов, які є справедливими для резервних шляхів, необхідно знову ввести до розгляду одновимірну мережу  $\bar{S}$ , структура якої є тотожною до мережі  $S$ , тобто їхні розміри є однаковими та відповідають кількості каналів зв'язку у вихідній ТКМ. Повноцінний захист структурних елементів ТКМ (каналу/вузла/шляху) в цьому випадку буде реалізовуватися не в процесі зміни порядку визначення геометричного простору, а шляхом забезпечення виконання умов (3.8)–(3.11). Під час реалізації швидкої перемаршрутизації тензорна модель мережі (2.4), (2.5) розглядатиметься в системах координат міжполюсних шляхів  $\{\bar{\gamma}_i, i = \overline{1, \bar{\kappa}}\}$  та внутрішніх вузлових пар  $\{\bar{\varepsilon}_j, j = \overline{1, \bar{\vartheta}}\}$  мережі  $\bar{S}$ , у якій проекції тензора будуть позначатися індексом  $\gamma \in$ . Тоді матимуть місце такі співвідношення:

$$\bar{\kappa}(\bar{S}) = \mu + 1 = n - m + 2; \quad \bar{\vartheta}(\bar{S}) = \phi - 1 = m - 2, \quad (3.19)$$

що визначають кількість базисних міжполюсних шляхів та внутрішніх вузлових пар у мережі  $\bar{S}$  за умови використання в ході швидкої перемаршрутизації резервного мультишляху. Принципи формування метричних тензорів залишають аналогічними до правил, прописаних у пункті 3.3.1.

Шукані умови забезпечення якості обслуговування за показниками мережної продуктивності вздовж резервних шляхів, зберігаючи аналогічний до (2.59) геометричний та фізичний зміст, будуть мати такий вигляд:

$$\tau_{\langle \text{don} \rangle} \bar{\lambda}^* \geq \bar{\Lambda}_\gamma \bar{E}_{\gamma\epsilon}^{(1)} \bar{\Lambda}_\gamma + \bar{\Lambda}_\gamma \bar{E}_{\gamma\epsilon}^{(2)} \bar{\Lambda}_\epsilon, \quad (3.20)$$

де  $\bar{\lambda}^*$  – інтенсивність потоку пакетів, що були успішно доставлені до маршрутизатора-отримувача за допомогою резервних шляхів.

Виконання QoS-умов (2.59) та (3.20) одночасно з (3.10)–(3.13) гарантує захист рівня якості обслуговування за множиною показників мережної продуктивності під час реалізації швидкої перемаршрутизації у випадку відмов структурних елементів мережі – вузлів, каналів зв'язку та маршрутів. Особливістю використання тензорної моделі ТКМ, представленої в базисі незалежних міжполюсних шляхів та внутрішніх вузлових пар, є відсутність вимог щодо рівності нулю контурних затримок пакетів (2.39) та (3.17). Тому умови захисту рівня QoS (2.59) і (3.20) повністю сумісні з умовами захисту маршруту в ТКМ (3.10).

Отже, у межах запропонованої тензорної моделі, представленої в базисі міжполюсних шляхів та внутрішніх вузлових пар, задачу швидкої перемаршрутизації в телекомунікаційній мережі знову можна сформулювати в оптимізаційній формі. Як критерій оптимальності пропонується використовувати вираз (3.14), а обмеженнями на маршрутні змінні будуть умови реалізації одно- та багатошляхової маршрутизації (2.64) та (3.1), умови збереження потоку (2.71) і (3.2), умови захисту структурних елементів мережі (3.7)–(3.10), умови захисту рівня QoS (3.11)–(3.13), (2.59) та (3.20). Сформульована задача також належить до класу задач нелінійного програмування та може бути розв'язана за допомогою відповідних оптимізаційних методів [255–261].

### 3.4. Дослідження системи тензорних моделей швидкої перемаршрутизації із захистом рівня якості обслуговування за множиною показників мережної продуктивності

#### 3.4.1. Дослідження тензорної моделі швидкої перемаршрутизації в телекомунікаційній мережі, яка представлена в базисі контурів та вузлових пар

Для перевірки адекватності та працездатності тензорної моделі швидкої перемаршрутизації в телекомунікаційній мережі, яка описана в пункті 3.3.1, проведено її дослідження на фрагменті мережі, зображеному на рис. 3.5.

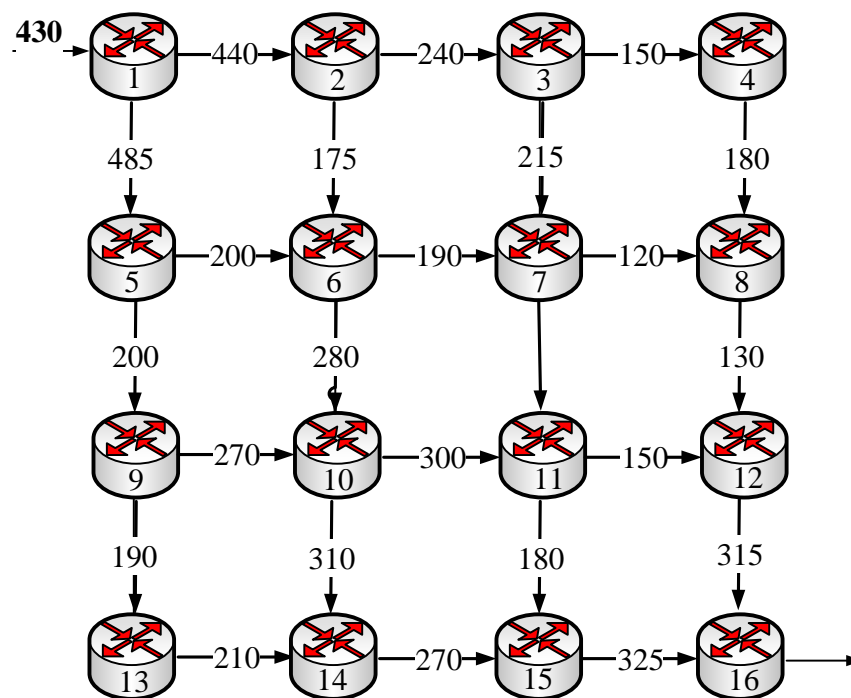


Рис. 3.5. Досліджуваний фрагмент телекомунікаційної мережі

За аналогією до прикладу, наведеному в підрозділі 3.2, досліджувана мережа складалася з 16 маршрутизаторів і 24 каналів зв'язку, із зазначенням у розривах каналів зв'язку їхньої пропускної здатності ( $1/c$ ). Нехай унаслідок

розв'язання задачі швидкої перемаршрутизації необхідно реалізувати схему захисту десятого маршрутизатора в разі його відмови. Для наочності розглянуто однопотоковий випадок, тобто коли  $k=1$ . Потік пакетів передавався між першим і шістнадцятим маршрутизаторами з наступними QoS-вимогами:

$$\lambda_1^{\langle \text{вим} \rangle} = 430 \text{ 1/с}, p_{\langle \text{дон} \rangle}^1 = 0,015, \tau_{\langle \text{вим} \rangle}^1 = 150 \text{ мс}.$$

Для прикладу робота кожного з інтерфейсів маршрутизаторів мережі моделювалася системою масового обслуговування M/M/1/N, а ємність буфера становила ( $N=30$ ). У процесі розрахунку основного мультишляху в тензорному описі ТКМ мережа  $S$  (рис. 3.6) визначала  $n$ -вимірний простір, де  $n=24$ , а  $m=16$ . Тоді цикломатичне число дорівнювало  $\mu(S)=9$ , а ранг мережі –  $\phi(S)=15$ . Порядок вибору множин базисних контурів і вузлових пар також зображений на рис. 3.6.

У процесі передачі потоку пакетів по резервному мультишляху мережу  $\bar{S}$  визначав дискретний  $\bar{n}$ -вимірний простір, де  $\bar{n}=20$ , а  $\bar{m}=15$ . Зменшення розміру введеного простору пов'язано із захистом одного (десятого) маршрутизатора та інцидентних йому чотирьох каналів зв'язку. Тоді цикломатичне число та ранг мережі  $\bar{S}$  дорівнювали  $\mu(\bar{S})=6$  і  $\phi(\bar{S})=14$  відповідно. У цьому випадку використовувалася множина базисних контурів і вузлових пар, показаних на рис.3.7.

У розрахунку основного мультишляху для обраного остова  $\{v_1, v_2, v_3, v_4, v_6, v_7, v_9, v_{11}, v_{12}, v_{13}, v_{14}, v_{15}, v_{16}, v_{17}, v_{18}, v_{19}, v_{20}, v_{21}, v_{22}, v_{23}, v_{24}\}$  у мережі хордами є гілки  $v_8, v_{10}, v_{12}, v_{15}, v_{17}, v_{19}, v_{22}, v_{23}, v_{24}$ , які визначають базисні контури  $\pi_1 \div \pi_9$ .

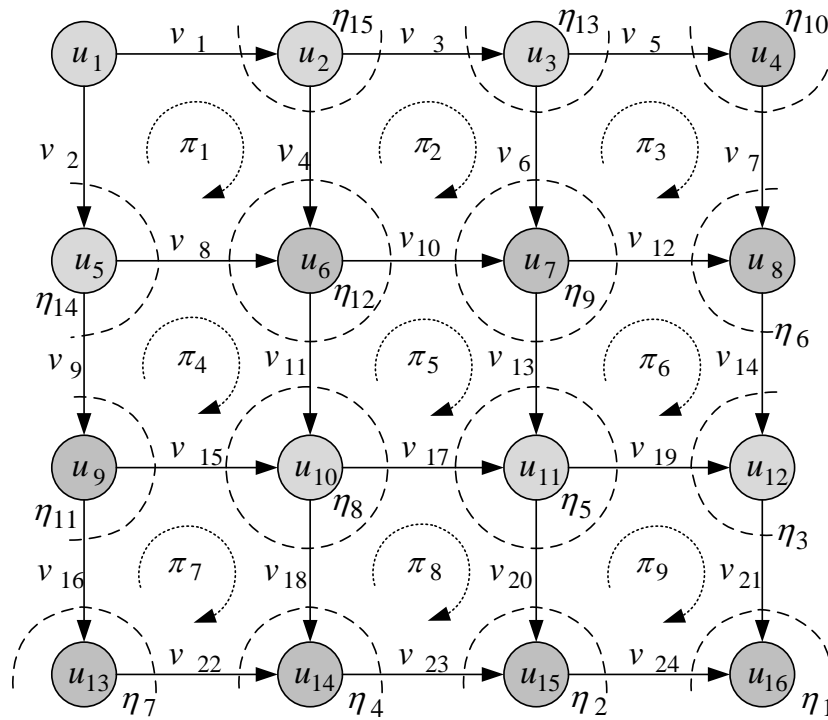


Рис. 3.6. Приклад вибору множин базисних контурів і вузлових пар у процесі передачі потоку пакетів основним мультишляхом

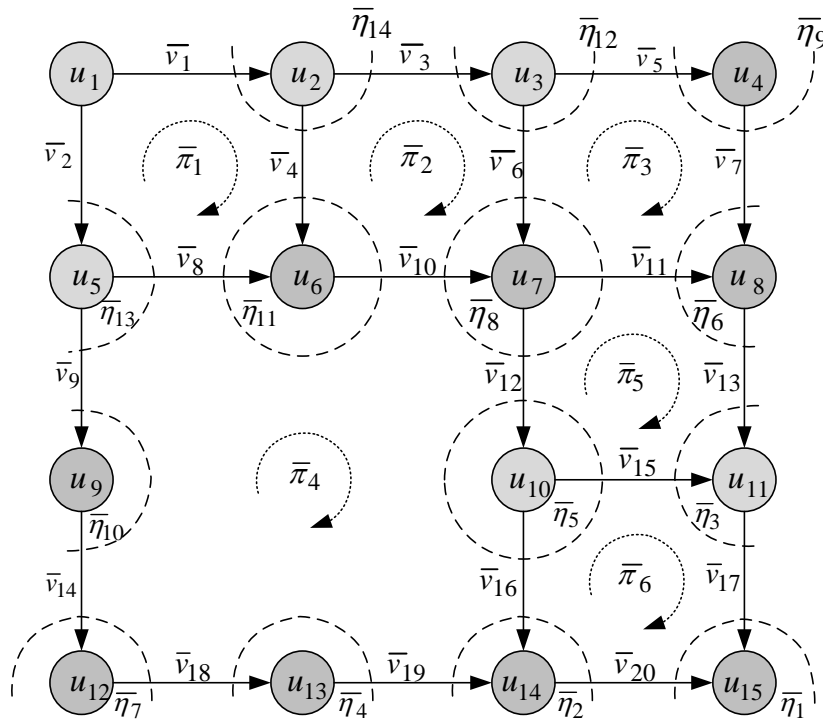


Рис. 3.7. Приклад вибору множин базисних контурів і вузлових пар у процесі передачі потоку пакетів резервним мультишляхом

Також у розрахунку резервного мультишляху для остова  $\{\bar{v}_1, \bar{v}_2, \bar{v}_3, \bar{v}_4, \bar{v}_6, \bar{v}_7, \bar{v}_8, \bar{v}_9, \bar{v}_{11}, \bar{v}_{12}, \bar{v}_{13}, \bar{v}_{14}, \bar{v}_{15}, \bar{v}_{16}, \bar{v}_{17}, \bar{v}_{18}, \bar{v}_{19}, \bar{v}_{20}\}$  у мережі  $\bar{S}$  хордами є гілки  $\bar{v}_8, \bar{v}_{10}, \bar{v}_{11}, \bar{v}_{15}, \bar{v}_{18}, \bar{v}_{19}, \bar{v}_{20}$ , які визначають шість базисних контурів  $\bar{\pi}_1 \div \bar{\pi}_6$ . Тоді правила перетворення базисів гілок та незалежних контурів і вузлових пар у розрахунку основного й резервного мультишляхів задаються відповідно таким чином:

$$\left\{ \begin{array}{l} \pi_1 = -v_8; \\ \pi_2 = -v_{10}; \\ \pi_3 = -v_{12}; \\ \pi_4 = -v_{15}; \\ \pi_5 = -v_{17}; \\ \pi_6 = -v_{19}; \\ \pi_7 = -v_{22}; \\ \pi_8 = -v_{23}; \\ \pi_9 = -v_{24}; \\ \eta_1 = v_{21} + v_{24}; \\ \eta_2 = v_{20} + v_{23} - v_{24}; \\ \eta_3 = v_{14} + v_{19} - v_{21}; \\ \eta_4 = v_{18} + v_{22} - v_{23}; \\ \eta_5 = v_{13} + v_{17} - v_{19} - v_{20}; \\ \eta_6 = v_7 + v_{12} - v_{14}; \\ \eta_7 = v_{16} - v_{22}; \\ \eta_8 = v_{11} + v_{15} - v_{17} - v_{18}; \\ \eta_9 = v_6 + v_{10} - v_{12} - v_{13}; \\ \eta_{10} = v_5 - v_7; \\ \eta_{11} = v_9 - v_{15} - v_{16}; \\ \eta_{12} = v_4 + v_8 - v_{10} - v_{11}; \\ \eta_{13} = v_3 - v_5 - v_6; \\ \eta_{14} = v_2 - v_8 - v_9; \\ \eta_{15} = v_1 - v_3 - v_4. \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} \bar{\pi}_1 = -\bar{v}_8; \\ \bar{\pi}_2 = -\bar{v}_{10}; \\ \bar{\pi}_3 = -\bar{v}_{11}; \\ \bar{\pi}_4 = -\bar{v}_{18} - \bar{v}_{19}; \\ \bar{\pi}_5 = -\bar{v}_{15}; \\ \bar{\pi}_6 = -\bar{v}_{20}; \\ \bar{\eta}_1 = \bar{v}_{17} + \bar{v}_{20}; \\ \bar{\eta}_2 = \bar{v}_{19} - \bar{v}_{20}; \\ \bar{\eta}_3 = \bar{v}_{13} + \bar{v}_{15} - \bar{v}_{17}; \\ \bar{\eta}_4 = \bar{v}_{18} - \bar{v}_{19}; \\ \bar{\eta}_5 = \bar{v}_{12} - \bar{v}_{15} - \bar{v}_{16}; \\ \bar{\eta}_6 = \bar{v}_7 + \bar{v}_{11} - \bar{v}_{13}; \\ \bar{\eta}_7 = \bar{v}_{14} - \bar{v}_{18}; \\ \bar{\eta}_8 = \bar{v}_6 + \bar{v}_{10} - \bar{v}_{11} - \bar{v}_{12}; \\ \bar{\eta}_9 = \bar{v}_5 - \bar{v}_7; \\ \bar{\eta}_{10} = \bar{v}_9 - \bar{v}_{14}; \\ \bar{\eta}_{11} = \bar{v}_4 + \bar{v}_8 - \bar{v}_{10}; \\ \bar{\eta}_{12} = \bar{v}_3 - \bar{v}_5 - \bar{v}_6; \\ \bar{\eta}_{13} = \bar{v}_2 - \bar{v}_8 - \bar{v}_9; \\ \bar{\eta}_{14} = \bar{v}_1 - \bar{v}_3 - \bar{v}_4. \end{array} \right.$$





$$\bar{A} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

Відповідно до зазначених вихідних даних та QoS-вимог було розв'язано задачу швидкої перемаршрутизації за допомогою запропонованої в пункті 3.3.1 тензорної моделі (3.14), (2.64) та (3.1), (2.71) та (3.2), (2.39) та (3.17), (3.11)–(3.13), (2.38) та (3.16), результати якої представлені в табл. 3.3.

Аналіз результатів, наведених у табл. 3.3, показав, що в процесі швидкої перемаршрутизації забезпечувався захист десятого маршрутизатора та заданого рівня QoS за множиною показників мережної продуктивності.

У використанні основного або резервного мультишляху забезпечувався заданий рівень якості обслуговування за показниками пропускної здатності, середньої міжкінцевої затримки та ймовірності втрат пакетів.

**Порядок маршрутизації потоку пакетів, що передаються основним і резервним мультишляхами, отриманого за допомогою тензорної моделі, представленої в базисі контурів та вузлових пар**

Канал зв'язку	$\varphi_{i,j}$ , 1/с	QoS-вимоги: $\lambda_1^{\langle \text{вим} \rangle} = 430$ 1/с, $p_{\langle \text{дон} \rangle}^1 = 0,015$ , $\tau_{\langle \text{вим} \rangle}^1 = 150$ мс.					
		Результати розрахунків для основного мультишляху			Результати розрахунків для резервного мультишляху		
		$\lambda_{i,j}^1$ , 1/с	$r_{i,j}^1$ , 1/с	$\tau_{i,j}^1$ , мс	$\bar{\lambda}_{i,j}^1$ , 1/с	$\bar{r}_{i,j}^1$ , 1/с	$\bar{\tau}_{i,j}^1$ , мс
(1,2)	440	197,3368	0	4,1	192,8772	0	4
(1,5)	485	232,6632	0	4	237,1228	0	4
(2,3)	240	121,1699	0	8,4	153,3677	0,0001	11,5
(2,6)	175	76,1670	0	10,1	39,5094	0	7,4
(3,4)	150	49,5613	0	10	71,7225	0	12,8
(3,7)	215	71,6086	0	7	81,6451	0	7,5
(4,8)	180	49,5613	0	7,7	71,7225	0	9,2
(5,6)	200	102,6864	0	10,3	64,7351	0	7,4
(5,9)	220	129,9768	0,0001	14,3	172,3877	0,2788	34,4
(6,7)	190	0,2905	0	5,3	104,2445	0	11,7
(6,10)	280	178,5628	0,0001	9,9	-	-	-
(7,8)	120	26,0931	0	10,6	51,0906	0	14,5
(7,11)	140	45,8060	0	10,6	134,7991	2,3286	89,3
(8,12)	130	75,6544	0	18,4	122,8131	1,4880	86,9
(9,10)	270	99,1655	0	5,9	-	-	-
(9,13)	190	30,8112	0	6,3	172,1090	0,8748	47,1
(10,11)	300	134,1471	0	6	-	-	-
(10,14)	310	143,5811	0	6	-	-	-
(11,12)	150	95,7508	0	18,4	67,2401	0	12,1
(11,15)	180	84,2023	0	10,4	65,2303	0	8,7
(12,16)	315	171,4052	0	7	188,5652	0	7,9
(13,14)	210	30,8112	0	5,6	171,2342	0,0695	25,5
(14,15)	270	174,3923	0,0001	10,5	171,1647	0,0001	10,1
(15,16)	325	258,5945	0,0556	15	236,3950	0,0046	11,3

Так, уздовж кожного із шляхів, що входить в основний мультишлях, середня міжкінцева затримка становила 55,5 мс, а для резервного мультишляху – 132,4 мс, що не перевищувало рівень QoS-вимоги:  $\tau_{\langle \text{вим} \rangle}^1 = 150$  мс.

Підсумкова ймовірність втрат пакетів, за умови їхньої передачі вздовж основного мультишляху, становила приблизно 0,00013, а в разі використання

резервного мультишляху  $\approx 0,01173$ , що також відповідало QoS-вимогам  $P_{\langle don \rangle}^1 = 0,015$ .

На рис. 3.8 показано порядок маршрутизації потоку пакетів, які передаються за основним, а на рис. 3.9 – за резервним мультишляхом. На цих рисунках у розривах каналів зв'язку вказані такі дані (зверху донизу): інтенсивність потоку пакетів у даному каналі зв'язку (1/с), пропускна здатність каналу (1/с), середня затримка пакетів у каналі (мс). Біля перевантажених інтерфейсів стрілкою вказана інтенсивність відкинутих пакетів  $k$ -го потоку ( $r_{i,j}^1$ ). Отже, наведений розрахунковий приклад підтвердив адекватність запропонованої тензорної моделі телекомунікаційної мережі, представленої в базисі контурів та вузлових пар (з точки зору реалізації схем захисту структурних елементів мережі (вузла, каналів) та рівня якості обслуговування за множиною показників мережної продуктивності – пропускної здатності, середньої міжкінцевої затримки та ймовірності втрат пакетів).

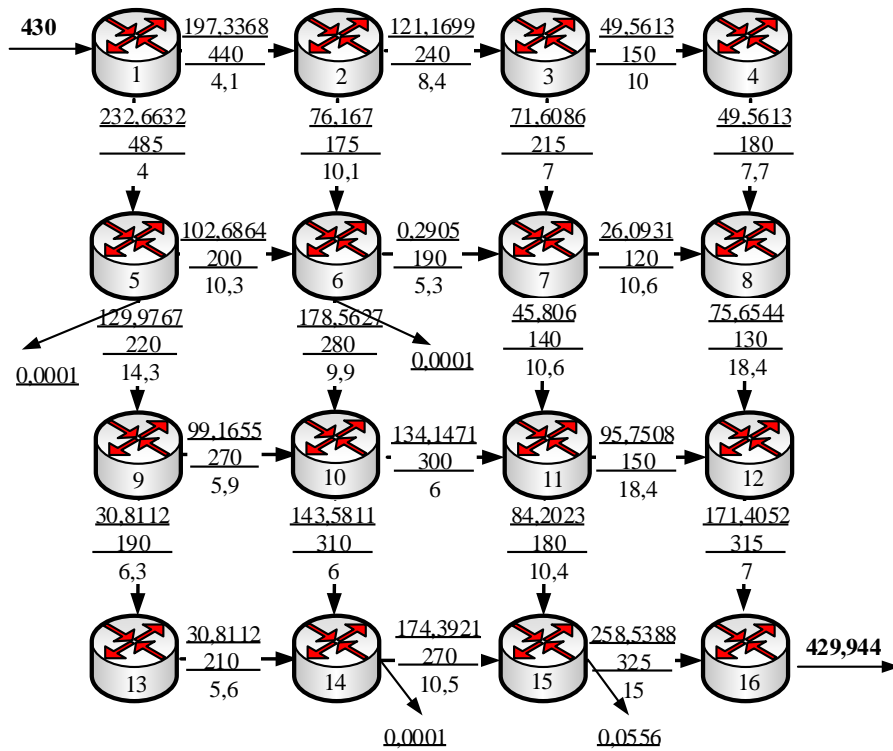


Рис. 3.8. Порядок маршрутизації потоку пакетів основним мультишляхом

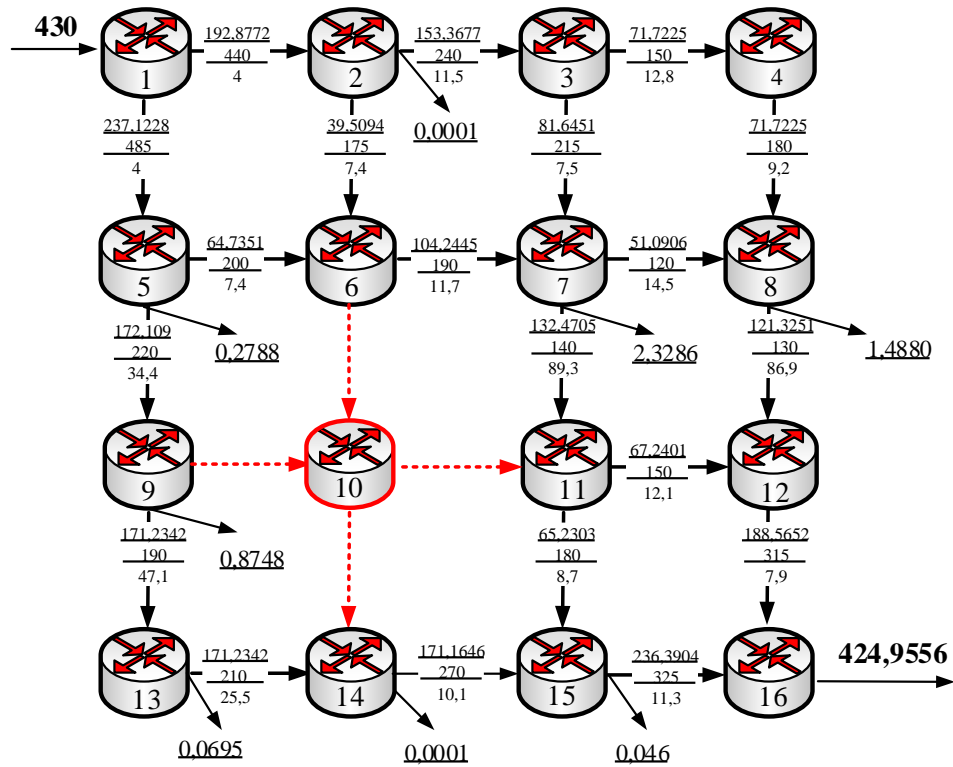


Рис. 3.9. Порядок маршрутизації потоку пакетів резервним мультишляхом

### 3.4.2. Дослідження тензорної моделі швидкої перемаршрутизації в телекомунікаційній мережі, яка представлена в базисі міжполюсних шляхів і внутрішніх вузлових пар

Для оцінки адекватності та працездатності запропонованої в пункті 3.3.2 тензорної моделі швидкої перемаршрутизації в ТКМ, представленої в базисі міжполюсних шляхів і внутрішніх вузлових пар, розв'яжемо задачу для фрагменту телекомунікаційної мережі, зображеного на рис. 3.10. Для проведення дослідження використаємо приклад структури мережі, яка складалась з 9 маршрутизаторів і 12 каналів зв'язку із зазначенням у розривах каналів зв'язку їхньої пропускної здатності (1/с).

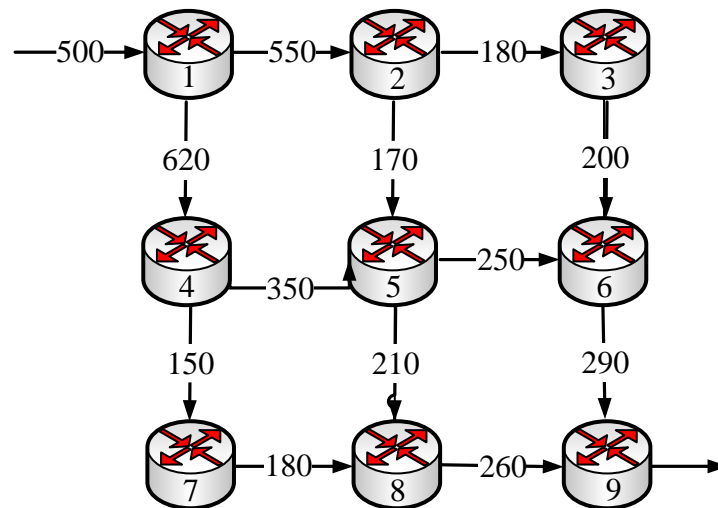


Рис. 3.10. Досліджуваний фрагмент телекомунікаційної мережі

Для наочності в межах цього дослідження розглянуто також однопоточковий випадок (якщо  $k = 1$ ), коли один потік пакетів передавався між першим і дев'ятим маршрутизаторами. Нехай унаслідок розв'язання задачі швидкої перемаршрутизації необхідно реалізувати схему захисту сьомого маршрутизатора в разі його відмови та заданого рівня якості обслуговування, коли вимоги до показників мережної продуктивності задавалися таким чином:

$$\lambda_1^{\langle \text{вим} \rangle} = 500 \text{ 1/с}; p_{\langle \text{дон} \rangle}^1 = 0,02; \tau_{\langle \text{вим} \rangle}^1 = 150 \text{ мс},$$

а робота кожного з інтерфейсів маршрутизаторів мережі моделювалася системою масового обслуговування  $M/M/1/N$  із ємністю буфера  $N = 30$ .

Тоді, відповідно до тензорної формалізації ТКМ, представленої в підрозділі 2.3, на рис. 3.11 показано результат визначення для структури ТКМ (рис. 3.10) базисних міжполюсних шляхів і внутрішніх вузлових пар, коли полюсами були вузли  $u_1$  та  $u_9$ , а основні структурні характеристики приймали такі значення:

$$n = 12, \kappa(S) = 5, \mathfrak{R}(S) = 7.$$

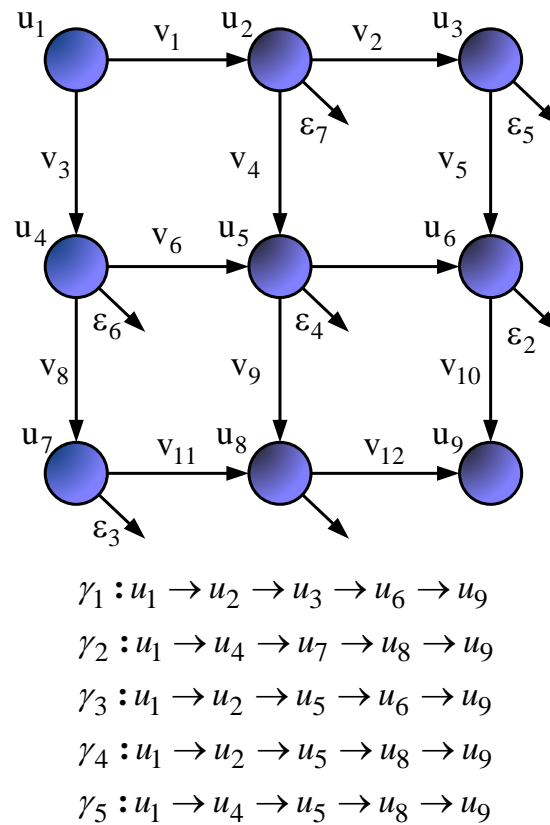


Рис. 3.11. Приклад визначення базисних міжполюсних шляхів та внутрішніх вузлових пар для досліджуваного фрагмента телекомунікаційної мережі

Тоді матриця коваріантного перетворення координат уведених тензорів у процесі розрахунку основного та резервного мультишляхів буде мати такий вигляд:

$$A_{\gamma\varepsilon}^v = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 \\ 0 & 1 & 0 & -1 & 1 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

Відповідно до зазначених вихідних даних та QoS-вимог було отримано рішення задачі швидкої перемаршрутизації за допомогою запропонованої тензорної моделі, результати якого представлені в табл. 3.4.

Таблиця 3.4

**Порядок маршрутизації потоку пакетів основним та резервним  
мультишляхами**

Канал зв'язку	$\varphi_{i,j}$ , 1/с	QoS-вимоги: $\lambda_1^{\langle \text{вим} \rangle} = 500$ 1/с; $P_{\langle \text{дон} \rangle}^1 = 0,02$ ; $\tau_{\langle \text{вим} \rangle}^1 = 150$ мс.					
		Результати розрахунків для основного мультишляху			Результати розрахунків для резервного мультишляху		
		$\lambda_{i,j}^1$ , 1/с	$r_{i,j}^1$ , 1/с	$\tau_{i,j}^1$ , мс	$\bar{\lambda}_{i,j}^1$ , 1/с	$\bar{r}_{i,j}^1$ , 1/с	$\bar{\tau}_{i,j}^1$ , мс
(1,2)	550	188,91	0	2,8	263,38	0	3,5
(1,4)	620	311,09	0	3,2	236,62	0	2,6
(2,3)	180	104,17	0	13,2	112,77	0	14,9
(2,5)	170	84,74	0	11,7	150,57	0,04	50,9
(3,6)	200	104,17	0	10,4	112,77	0	11,5
(4,5)	350	219,25	0	7,6	236,62	0	8,8
(4,7)	150	91,84	0	17,2	-	-	-
(5,6)	250	160,95	0	11,2	177,21	0	13,7
(5,8)	210	143,04	0	14,9	205,87	4,11	119
(6,9)	290	264,86	0,26	38,2	284,3	5,68	86,2
(7,8)	180	91,84	0	11,3	-	-	--
(8,9)	260	234,74	0,14	38,6	205,87	0	18,5

Для наочності на рис. 3.12 та 3.13 наведено розв'язання задачі щодо розрахунку множини основних та резервних шляхів в умовах захисту сьомого маршрутизатора. Аналогічно з дослідженнями, запропонованими в підрозділі 3.2, у розривах каналів зв'язку результати представлені у вигляді дробу та характеризують (зверху донизу): інтенсивність потоку пакетів у даному каналі зв'язку (1/с), пропускну здатність каналу (1/с), середню затримку пакетів у каналі (мс), а біля перевантажених інтерфейсів стрілкою вказана інтенсивність відкинутих пакетів  $k$ -го потоку ( $r_{i,j}^1$  та  $\bar{r}_{i,j}^1$ ) у використанні основного та резервного мультишляхів відповідно.



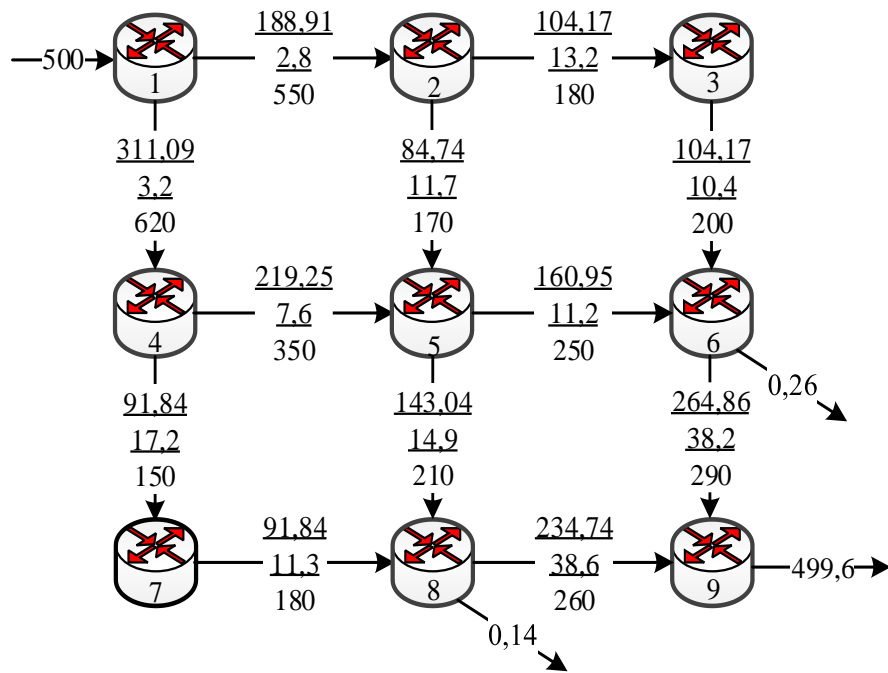


Рис. 3.12. Порядок маршрутизації потоку пакетів, які передаються основним мультишляхом

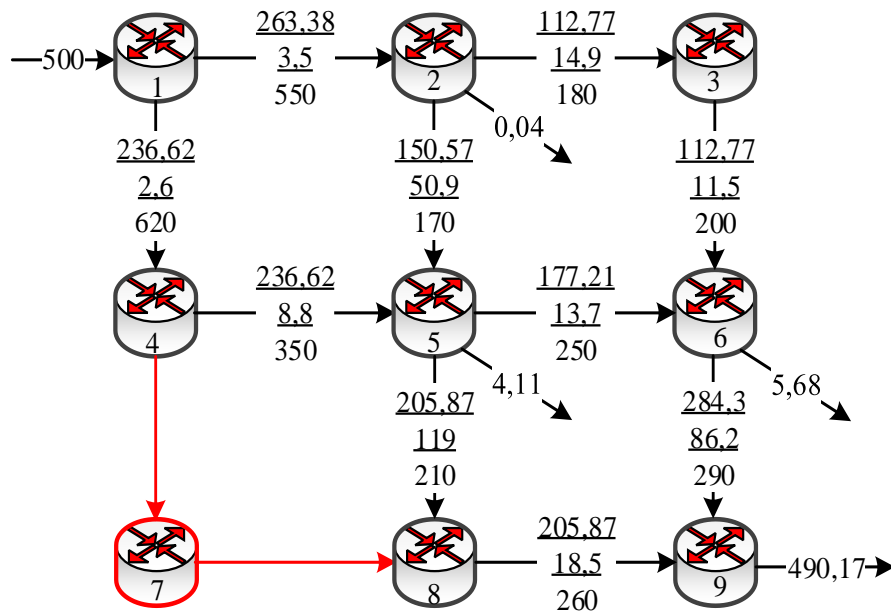


Рис. 3.13. Порядок маршрутизації потоку пакетів, які передаються резервним мультишляхом

Для основного мультишляху середня міжкінцева затримка становила  $\tau_{MP} = 64,8$  мс, а для резервного мультишляху –  $\bar{\tau}_{MP} = 141,1$  мс, що не

перевищувало рівень QoS-вимог:  $\tau_{\langle \text{вим} \rangle}^1 = 150 \text{ мс}$ . Підсумкова ймовірність втрат пакетів у процесі їхньої передачі вздовж основного мультишляху становила  $p_r = 0,0008$ , а за умови використання резервного мультишляху –  $\bar{p}_r = 0,0197$ , що також відповідало QoS-вимогам:  $p_{\langle \text{дон} \rangle}^1 = 0,02$ .

Отже, отримані результати дослідження запропонованої моделі мережі, представленої в базисі міжполюсних шляхів і внутрішніх вузлових пар, підтверджують, що в процесі захисту структурних елементів мережі вздовж основного та резервного мультишляхів забезпечувався заданий рівень якості обслуговування за показниками пропускної здатності, середньої міжкінцевої затримки та ймовірності втрат пакетів. Це також свідчить про забезпечення захисту рівня якості обслуговування за переліченими показниками мережної продуктивності.

### 3.5. Висновки до третього розділу

1. Уперше запропоновано математичну модель швидкої перемаршрутизації трафіка даних із захистом рівня якості обслуговування за показниками пропускної здатності та ймовірності втрат пакетів у телекомунікаційній мережі. Використання моделі дозволяє реалізувати відомі схеми захисту каналу, вузла та маршруту в ТКМ із забезпеченням допустимих значень пропускної здатності та ймовірності втрат пакетів як уздовж основного, так і вздовж резервного шляху (шляхів). Результати дослідження моделі підтвердили її адекватність та працездатність у розв'язанні задач швидкої перемаршрутизації трафіка даних.

2. Удосконалено систему тензорних моделей швидкої перемаршрутизації із захистом рівня якості обслуговування в ТКМ за множиною показників мережної продуктивності – пропускної здатності, середньої міжкінцевої затримки та ймовірності втрат пакетів. Новизна запропонованих тензорних моделей полягає у формалізації умови забезпечення захисту рівня якості

обслуговування за множиною показників мережної продуктивності, що особливо важливо під час маршрутизації мультимедійного трафіка. Запропоновані умови забезпечення захисту рівня якості обслуговування виконувались як уздовж основних, так і резервних шляхів. Крім того, вони є справедливими не тільки в процесі реалізації схем захисту каналів та вузлів, але й за умов захисту маршруту (маршрутів) мережі.

3. У межах запропонованої системи моделей розроблено тензорну модель телекомунікаційній мережі, представленій в базисі контурів та вузлових пар, що дозволило задачу швидкої перемаршрутизації сформулювати в оптимізаційній формі. Як критерій оптимальності пропонується використовувати вираз (3.14), а обмеженнями на маршрутні змінні будуть умови реалізації багатошляхової маршрутизації (2.64) та (3.1), умови збереження потоку (2.71) і (3.2), умови відсутності контурів (2.39) та (3.17) а також умови захисту рівня якості обслуговування за множиною показників мережної продуктивності (3.11)–(3.13), (2.38) і (3.16). Реалізацію схем захисту структурних елементів ТКМ удалося забезпечити на етапі геометризації структури мережі, коли канали та вузли, що підлягали захисту (резервуванню), не включалися в розмір уведеного простору та систем координат.

4. Розроблено тензорну модель ТКМ, представлену в базисі міжполюсних шляхів та внутрішніх вузлових пар, у межах якої задачу швидкої перемаршрутизації в телекомунікаційній мережі сформульовано в оптимізаційній формі. Як критерій оптимальності пропонується використовувати вираз (3.14), а обмеженнями на маршрутні змінні будуть умови реалізації одно- та багатошляхової маршрутизації (2.64) та (3.1), умови збереження потоку (2.71) і (3.2), умови захисту структурних елементів мережі – каналу, вузла та маршруту (3.8)–(3.10), умови захисту рівня QoS за показниками мережної продуктивності (3.11)–(3.13), (2.59) та (3.20).

5. На кількох розрахункових прикладах продемонстрована працездатність запропонованої системи тензорних моделей швидкої перемаршрутизації в ТКМ з точки зору захисту як структурних елементів мережі, так і рівня якості

обслуговування за множиною показників мережної продуктивності – пропускної здатності, середньої міжкінцевої затримки та ймовірності втрат пакетів. Результати дослідження підтвердили адекватність отриманих розрахункових рішень та їхню ефективність з точки зору реалізованих схем захисту (резервування).

## РОЗДІЛ 4

### ТЕНЗОРНІ МОДЕЛІ ТА МЕТОДИ ШВИДКОЇ ПЕРЕМАРШРУТИЗАЦІЇ ІЗ ЗАХИСТОМ РІВНЯ ЯКОСТІ ОБСЛУГОВУВАННЯ, ЩО СПРИЙМАЄТЬСЯ КІНЦЕВИМ КОРИСТУВАЧЕМ

Розділ присвячено розробленню тензорних моделей маршрутизації та швидкої перемаршрутизації із захистом рівня якості обслуговування, що сприймається кінцевим користувачем. Захист рівня якості сприйняття кінцевим користувачем залежно від контенту, який передається мережею, здійснюватиметься в межах розроблених моделей за такими показниками, як рейтинг якості (R-фактор) та якість мультимедіа. Актуальність та необхідність розроблення подібних математичних моделей ґрунтується на тому, що в структурі сучасного мережного трафіка в ТКМ стрімко зростає доля VoIP-потоків, мультимедійних онлайн-сервісів і додатків. Тому в умовах відмов мережного обладнання необхідно забезпечити захист якості обслуговування на рівні кінцевих користувачів, бо саме вони оцінюють якість різноманітних послуг, що надаються інтернет-провайдерами.

Особливістю запропонованих у розділі рішень є те, що, на відміну від наявних моделей та методів швидкої перемаршрутизації, завдяки тензорній формалізації розроблених моделей в аналітичному вигляді отримані умови забезпечення та захисту якості обслуговування на рівні користувача в ТКМ. Маршрутні рішення впливали на показники R-фактора та мультимедійної якості через взаємопов'язане управління (контроль) для кожного з мультимедійних аудіо- та відеопотоків середньою міжкінцевою затримкою та рівнем втрат пакетів, значення яких на мережному рівні моделі OSI є визначальними.

Матеріали розділу опубліковано в роботах [68, 88, 89, 102, 103, 105, 118, 122, 126].

#### 4.1. Тензорні моделі QoE-маршрутизації із забезпеченням якості обслуговування за показником R-фактора

Відповідно до поставленого наукового завдання, головною метою в розробленні моделі QoE-маршрутизації є отримання умов забезпечення заданого рівня якості сприйняття послуг, що надаються кінцевим користувачам у ТКМ за показником R-фактора. Для цього необхідно мати в своєму розпорядженні математичний вираз для розрахунку цього QoE-показника. Треба зазначити, що R-фактор є скалярною величиною, яка кількісно характеризує рейтинг якості обслуговування VoIP-потоків [176]. Цей показник має інтегральний вигляд, об'єднуючи в собі множину параметрів та характеристик різних рівнів OSI, що мають відношення до конкретного VoIP-потоків між вузлом-відправником та вузлом-отримувачем (рис. 4.1).

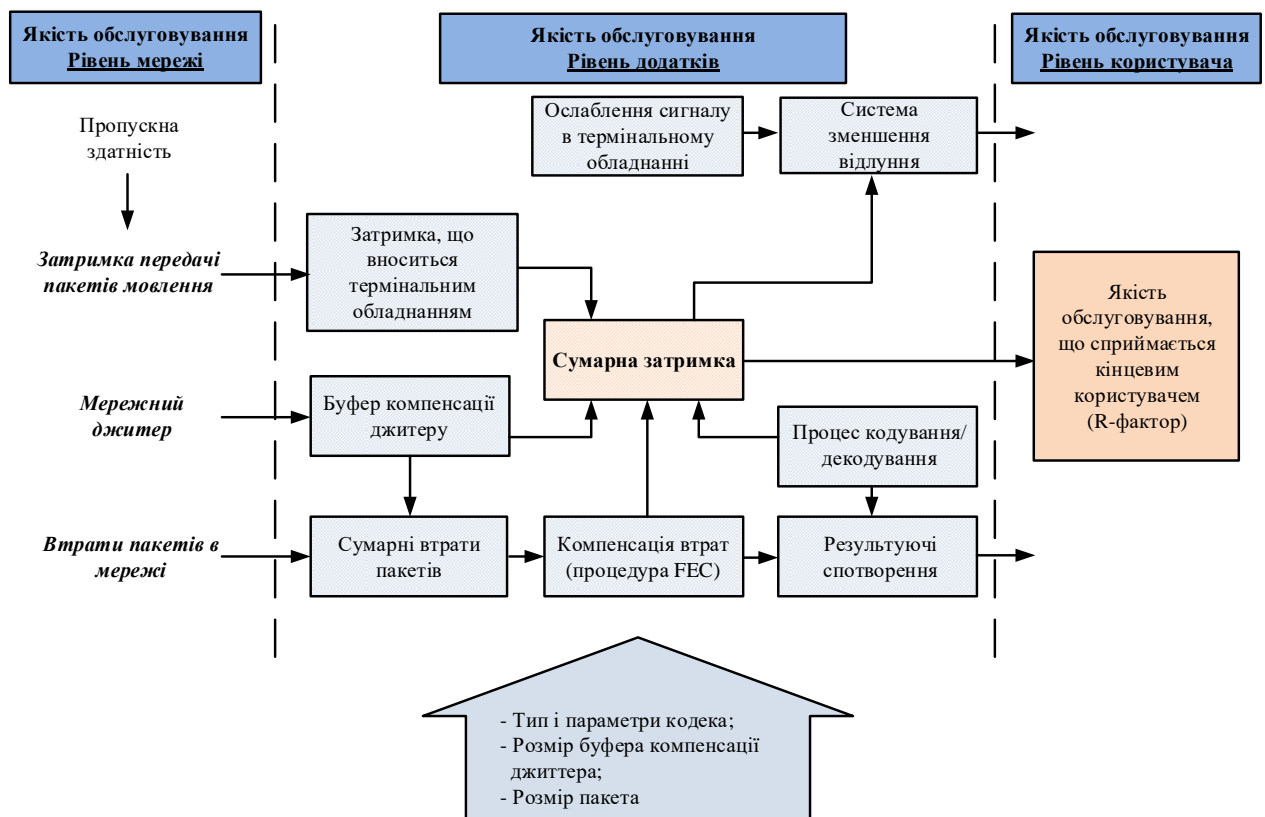


Рис. 4.1. Фактори, що впливають на якість передачі мови

Так, загалом, відповідно до рекомендації [176], R-фактор розраховується таким чином:

$$R = R_0 - I_s - I_d - I_{e-eff} + A, \quad (4.1)$$

де  $R_0$  – фактор, пов'язаний із значенням співвідношення сигнал/шум; цей показник враховує вплив усіх шумів, що виникають протягом передачі VoIP-трафіка (наприклад, шум обладнання, шум у приміщенні тощо); за замовчуванням  $R_0 = 93,2$ ;

$I_s$  – сумарний коефіцієнт зниження якості, викликане одночасними спотвореннями мовного сигналу, такими як низький загальний показник гучності, неоптимальний місцевий ефект, спотворення квантування тощо;

$I_d$  – коефіцієнт зниження якості, обумовлене впливом затримок та наявністю відлуння слухача та/або користувача (абонента), що говорить;

$I_{e-eff}$  – коефіцієнт зниження якості, викликане спотвореннями, що виникають у процесі кодування/декодування, а також втратами мовних пакетів;

$A$  – коефіцієнт виграшу, який залежить від типу ТКМ (звичайна проводова, мобільна, супутникова тощо) та відповідно задається для кожного типу мережі на стадії її проектування та функціонування.

Відповідно до рекомендацій G.107 [176], до самого R-фактора висуваються QoE-вимоги, які в загальному вигляді за заданим типом термінального обладнання та використовуваним кодеком можуть бути записані в такому вигляді:

$$R \geq R_{\langle \text{вим} \rangle}, \quad (4.2)$$

згідно з [164, 165, 176]

$$R = R_0 - I_{dd}(T_a) - I_{e-eff}(P_{pl}), \quad (4.3)$$

де  $I_{dd}(T_a)$  – коефіцієнт зниження якості, обумовленого тривалою затримкою VoIP пакетів;

$I_{e-eff}(P_{pl})$  – коефіцієнт зниження якості, викликаного втратами VoIP пакетів;

$T_a$  – середня міжкінцева затримка пакетів у мережі (мс);

$P_{pl}$  – відсоток втрачених пакетів у мережі.

Тоді розрахований завдяки виразу (4.3) R-фактор порівнюється із рекомендованими значеннями (4.2), які задаються в рекомендації [176] та представлені в табл. 4.1, що дозволяє оцінити якість надання послуг на рівні кінцевого користувача (задоволеність користувача) в ТКМ.

Таблиця 4.1

#### Співвідношення між QoE-показниками та рівнем задоволеності користувача

R-фактор	Показник мультимедійної якості $MMq$ (MOS)	Задоволеність користувача
90	4,34	дуже задоволений
80	4,03	задоволений
70	3,60	деякі користувачі не задоволені
60	3,10	багато користувачів не задоволені
50	2,58	майже всі користувачі не задоволені

Відповідно до виразу (4.3) для розрахунку R-фактора потрібно знайти зниження якості  $I_{dd}(T_a)$  та  $I_{e-eff}(P_{pl})$ . Так, коефіцієнт зниження якості, обумовленого тривалою затримкою  $I_{dd}(T_a)$ , у загальному вигляді визначається як [176]



$$I_{dd}(T_a) = 25 \left\{ \left( 1 + X^{6 \cdot sT} \right)^{\frac{1}{6 \cdot sT}} - 3 \left( 1 + \left[ \frac{X}{3} \right]^{6 \cdot sT} \right)^{\frac{1}{6 \cdot sT}} + 2 \right\}, \quad (4.4)$$

$$\text{де } X = \lg \frac{\left( \frac{T_a}{mT} \right)}{\lg 2};$$

$sT$  – параметр чутливості до затримок;

$mT$  – мінімальна затримка, яка сприймається (мс).

Варто зазначити, що залежно від класів чутливості до затримок для різних сценаріїв використання, згідно з [176], за замовчуванням ці параметри мають такі значення: якщо  $sT = 1$ ,  $mT = 100$  мс. До того ж, у випадку коли  $T_a \leq mT$ , тобто  $T_a \leq 100$  мс,  $I_{dd}(T_a) = 0$ , а в разі  $T_a \geq mT$ , в умовах низького та дуже низького класу чутливості до затримок,  $I_{dd}(T_a)$  буде розраховуватися за допомогою (4.4). Тоді, відповідно до [176], із урахуванням усіх вимог щодо чутливості до затримок коефіцієнт зниження якості, обумовленого тривалою затримкою  $I_{dd}(T_a)$ , пропонується використовувати такий вираз:

$$I_{dd}(T_a) = \begin{cases} 0, & T_a \leq 100 \text{ мс;} \\ 25 \left\{ \left( 1 + X^6 \right)^{\frac{1}{6}} - 3 \left( 1 + \left[ \frac{X}{3} \right]^6 \right)^{\frac{1}{6}} + 2 \right\}, & T_a > 100 \text{ мс,} \end{cases} \quad (4.5)$$

$$\text{де } X = \lg \frac{\left( \frac{T_a}{100} \right)}{\lg 2}.$$

Коефіцієнт зниження якості, викликаного втратами мовних пакетів, з виразу (4.3) розраховується таким чином:

$$I_{e-eff}(P_{pl}) = I_e + (95 - I_e) \frac{P_{pl}}{\frac{P_{pl}}{BurstR} + B_{pl}}, \quad (4.6)$$

де  $I_e$  – коефіцієнт зниження якості через використання низькошвидкісних кодеків [164];

$B_{pl}$  – фактор, що враховує стійкість мовного кодеку до втрат [164];

$BurstR$  – коефіцієнт «сплеску» втрат, який залежить від характеру втрат пакетів, тобто в разі довільних (незалежних) втрат пакетів –  $BurstR = 1$ , а за умови втрат пакетів із «сплеском» –  $BurstR > 1$ .

Тоді приведена нерівність (4.2) з урахуванням (4.5) та (4.6) буде головною умовою забезпечення якості сприйняття послуг, що надаються кінцевим користувачам за показником R-фактора в потоковій математичній моделі маршрутизації, яка наведена в пункті 2.5.2. Тому в ході подальших досліджень треба встановити функціональну залежність R-фактора від маршрутних змінних  $x_{i,j}^k$ . Загалом у мережі передається  $K$  потоків пакетів, але для зручності біля NP та QoE показників індекс  $k$ , який характеризує окремий  $k$ -й потік за умови  $k \in K$ , буде опущено.

Основна ідея, яка розвивається в цьому розділі, полягає в тому, щоб забезпечити заданий рівень QoE за значеннями R-фактора шляхом взаємопов'язаного управління показниками мережної продуктивності – середньою міжкінцевою затримкою  $T_a$  та відсотком втрат пакетів  $P_{pl}$  у процесі розрахунку маршрутних змінних  $x_{i,j}^k$  (рис. 4.2).

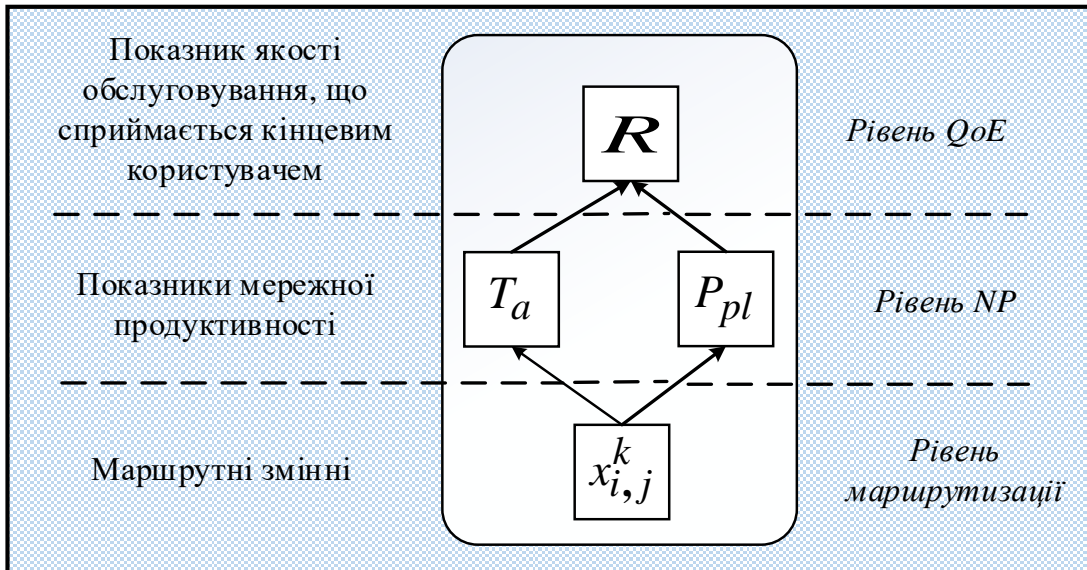


Рис. 4.2. Функціональна ієрархія залежності показників QoE, NP та маршрутних змінних

До того ж вимоги щодо допустимих значень самих показників мережної продуктивності, як це було, наприклад, розглянуто в третьому розділі, жорстко не встановлюються, що допускає під час розрахунків та реалізації шуканих маршрутів забезпечення високої гнучкості мережних рішень. Це обумовлено тим, що мережний ресурс (пропускна здатність та буфер черг) може певним чином перерозподілятися між  $T_a$  та  $P_{pl}$  для задоволення вимог щодо значень R-фактора (4.2).

Відповідно до рис. 4.2 для розрахунку R-фактора та подальшого забезпечення виконання умов (4.2) у ТКМ важливо мати у своєму розпорядженні математичні вирази, які аналітично описують взаємозв'язок маршрутних змінних  $x_{i,j}^k$ , характеристик трафіка, структурних параметрів мережі та, як результат, показників міжкінцевої затримки  $T_a$  та відсотка втрачених пакетів  $P_{pl}$ , що також будуть визначати величину R-фактора (4.3)–(4.6). Для цього, з урахуванням результатів, отриманих у другому розділі [77, 82, 83, 85, 104, 120], буде застосовано функціонал тензорного моделювання процесів маршрутизації із формалізацією в аналітичному вигляді виразів для

розрахунку показників  $T_a$  та  $P_{pl}$  у ТКМ, представлених у таких базисах: контурів і вузлових пар; міжполюсних шляхів та внутрішніх вузлових пар.

У першому випадку для формалізації в аналітичному вигляді таких показників, як середня міжкінцева затримка  $T_a$  та відсоток втрачених пакетів  $P_{pl}$ , пропонується використати тензорну модель маршрутизації в мережі, представленої в базисі контурів та вузлових пар (2.33)–(2.39). Ця модель базується на проведених у підрозділі 2.1 геометризації та метризації ТКМ (2.1)–(2.32), де вирази (2.27), (2.30) або (2.32) відповідають за метричні властивості введеного на структурі ТКМ геометричного простору, що залежать від функціональних параметрів мережі, таких як параметри інтерфейсів маршрутизаторів. Зауважимо, що для подальшого дослідження, запропонованого в цьому розділі, як приклад буде використано метрику (2.32), яка дозволяє врахувати середню затримку та ймовірність втрат пакетів у відповідному каналі зв'язку згідно з особливостями моделювання роботи інтерфейсів маршрутизаторів СМО М/М/1/Н [313].

Тензорна модель ТКМ, представлена в базисі контурів та вузлових пар (2.33)–(2.39), дозволяє розрахувати середню міжкінцеву затримку  $T_a$  за допомогою такого виразу:

$$T_a = \frac{\lambda^{\langle \text{вим} \rangle} b^k - G_{\pi\eta}^{\langle 4,2 \rangle} \left[ G_{\pi\eta}^{\langle 4,4 \rangle} \right]^{-1} \Lambda_{\eta-1}}{\left( G_{\pi\eta}^{\langle 4,1 \rangle} - G_{\pi\eta}^{\langle 4,2 \rangle} \left[ G_{\pi\eta}^{\langle 4,4 \rangle} \right]^{-1} G_{\pi\eta}^{\langle 4,3 \rangle} \right)} \cdot 1000, \quad (4.7)$$

якщо  $T_\pi = 0$ .

Процент втрачених пакетів  $P_{pl}$  буде розраховуватися за допомогою виразу (2.73) з урахуванням (2.36). Тобто для окремого  $k$ -го потоку пакетів параметри  $P_{pl}$  з (4.6) та  $p_\delta^k$  у виразі (2.73) мають однаковий фізичний зміст, тобто

$$P_{pl} = (1 - b^k) \cdot 100\% . \quad (4.8)$$

Отже, формалізовані в аналітичному вигляді вирази для розрахунку середньої міжкінцевої затримки (4.7) та відсоток втрат пакетів (4.8) у ТКМ дозволяють отримати значення R-фактора (4.3)–(4.6) для подальшого виконання умови (4.2). Фактично умови (4.2)–(4.6) слугують додатковими обмеженнями, які накладаються на маршрутні змінні в розв’язанні задач QoE-маршрутизації, оскільки координати проекцій метричного тензора та тензора середніх інтенсивностей потоків у координатних шляхах мережі (2.32) є функціями від  $x_{i,j}^k$ . Водночас важливо зазначити, що використання представленої тензорної моделі (4.7), як показано в другому розділі, виправдане в умовах високої завантаженості мережі та із задіянням усіх доступних каналів зв’язку між вузлом-відправником та вузлом-отримувачем.

У другому випадку, на відміну від рішення (4.7), для отримання в аналітичному вигляді показників середньої міжкінцевої затримки  $T_a$  та відсотка втрачених пакетів  $P_{pl}$  буде використана тензорна модель, представлена в системі координат міжполюсних шляхів та внутрішніх вузлових пар (2.1)–(2.32), (2.41)–(2.50). Тоді, ґрунтуючись на виразах (2.51) та (2.52), розрахувати середню міжкінцеву затримку пакетів  $T_a$  можна за допомогою виразу (2.58), тобто

$$T_a = \frac{1000}{\lambda_k^{(sum)} b^k} \left( \Lambda_\gamma^t E_{\gamma\epsilon}^{(1)} \Lambda_\gamma + \Lambda_\gamma^t E_{\gamma\epsilon}^{(2)} \Lambda_\epsilon \right). \quad (4.9)$$

Відсоток втрачених пакетів  $P_{pl}$ , як і раніше, буде розраховуватися за допомогою виразу (4.8). Зазначимо, що задачу QoE-маршрутизації можна сформулювати в оптимізаційній формі, тому важливо визначитися з видом та змістом критерію оптимальності. Так, для проведення дослідження в межах цієї дисертаційної роботи, унаслідок розв’язання задачі QoE-маршрутизації, яка базується на тензорній моделі (2.1)–(2.39), (2.63), (2.64), (2.66), (2.71) та (4.1)–

(4.9), як критерій оптимальності маршрутних рішень можна використати умову, пов'язану з максимізацією загальної продуктивності телекомунікаційної мережі (2.79).

Крім того, у випадку реалізації QoE-маршрутизації в операторській мережі доречно використовувати лінійний критерій оптимальності (2.75) або його квадратичний аналог, що сприяє економному використанню доступного мережного ресурсу відповідно до значень маршрутних метрик  $h_{i,j}^x$ . У разі використання критеріїв (2.75) або (2.79) обмеженнями, що накладаються на маршрутні змінні  $x_{i,j}^k$ , можуть бути умови реалізації одно- (2.63) та багатоадресної маршрутизації (2.64), умови збереження потоку (2.71), умови запобігання перевантаженню каналів зв'язку (2.66), умови забезпечення захисту рівня якості сприйняття послуг, що надаються кінцевим користувачам за показником R-фактора (4.2). У корпоративних територіально-розподілених мережах, коли весь доступний мережний (канальний та буферний) ресурс можна максимально задіяти на підвищення якості обслуговування на рівні кінцевого користувача, доцільно застосувати критерій вигляду

$$\sum_{k \in K} f(pr^k)R^k \rightarrow \max, \quad (4.10)$$

у якому  $f(pr^k)$  – вагова лінійно або нелінійно зростаюча функція від значень IP-пріоритету (класу)  $k$ -го VoIP-потoku пакетів;

$R^k$  – значення R-фактора для  $k$ -го VoIP-потoku пакетів.

Використання критерію (4.10) стає можливим завдяки аналітичному формулюванню QoE-показника R-фактора в межах моделі (4.1)–(4.9). Маршрутизація за критерієм оптимальності (4.10) дозволяє забезпечити диференційоване підвищення рівня QoE за показником R-фактора відповідно до значень IP-пріоритету або класу  $k$ -го VoIP-потoku пакетів. У цьому випадку та маршрутні змінні також накладаються обмеження (2.63), (2.64), (2.66), (2.71).

Для забезпечення гарантій на мінімальні значення R-фактора для того чи іншого VoIP-потоків пакетів можуть вводитись обмеження (4.2).

## 4.2. Дослідження запропонованих моделей QoE-маршрутизації із забезпеченням якості обслуговування за показником R-фактора

### 4.2.1. Дослідження тензорної моделі QoE-маршрутизації із забезпеченням якості обслуговування за показником R-фактора, представленої в базисі контурів та вузлових пар

Проведено оцінку ефективності маршрутних рішень, отриманих за допомогою запропонованої тензорної моделі QoE-маршрутизації із забезпеченням якості обслуговування за показником R-фактора (2.63), (2.64), (2.66), (2.71) та (4.1)–(4.8) та потоковою моделлю маршрутизації (2.64)–(2.66), яка базується на використанні метрики EIGRP [68]. Обидві моделі основані на використанні критерію оптимальності (2.75). Для зручності позначимо запропоновану модель – «*модель 1*», а модель з EIGRP-метрикою – «*модель 2*».

Для наочності отриманих результатів розв'яжемо задачу QoE-маршрутизації для фрагмента ТКМ, представленого на рис. 4.3.

На рис. 4.3 показано, що мережа складається з п'яти маршрутизаторів та шести каналів зв'язку, а в розривах каналів зв'язку вказана їхня пропускна здатність (1/с). До того ж під завантаженістю мережі розумілося відношення інтенсивності трафіка, що надходить у мережу, до її пропускної здатності. У зв'язку з цим інтенсивність трафіка, що надходить у мережу на перший маршрутизатор  $R_1$  та призначається для п'ятого маршрутизатора  $R_5$ , становила 310 1/с, а вимоги до рівня QoE задавалися значенням R-фактора та становили  $R_{\langle \text{вим} \rangle} = 70$  відповідно до даних, наведених у табл. 4.1 [165].

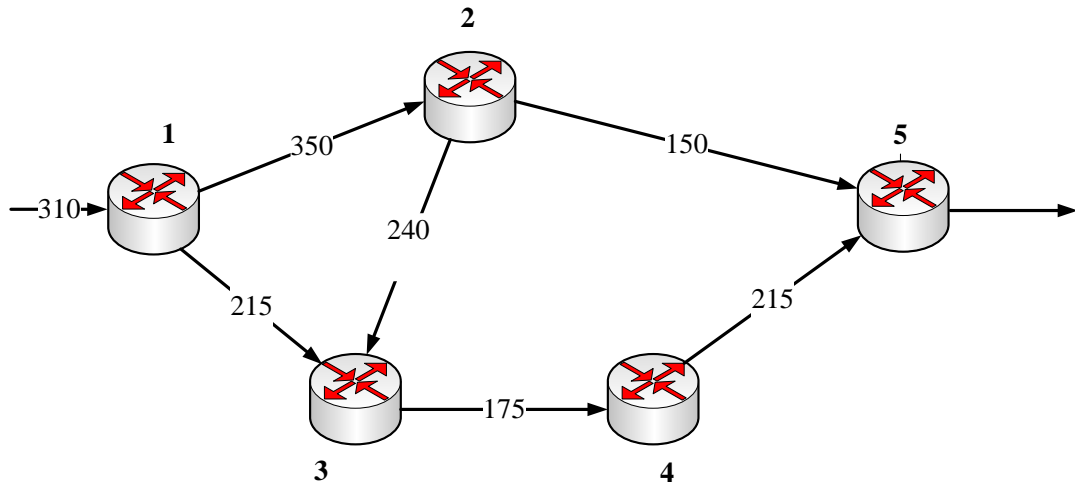


Рис. 4.3. Фрагмент досліджуваної телекомунікаційної мережі

Тоді результатом розв'язання задачі маршрутизації з використанням розробленої *моделі 1* і *моделі 2*, основаної на метриці EIGRP з критерієм оптимальності (4.9) і також умовою (4.2), є порядок розподілу потоку по окремих каналах зв'язку телекомунікаційної мережі, який зображений на рис. 4.4 та 4.5 відповідно, де в розривах каналів зв'язку вказані (зверху донизу) їхні пропускні здатності (1/с), інтенсивність потоку, що протікає в каналі зв'язку (1/с), та середня затримка пакетів (мс).

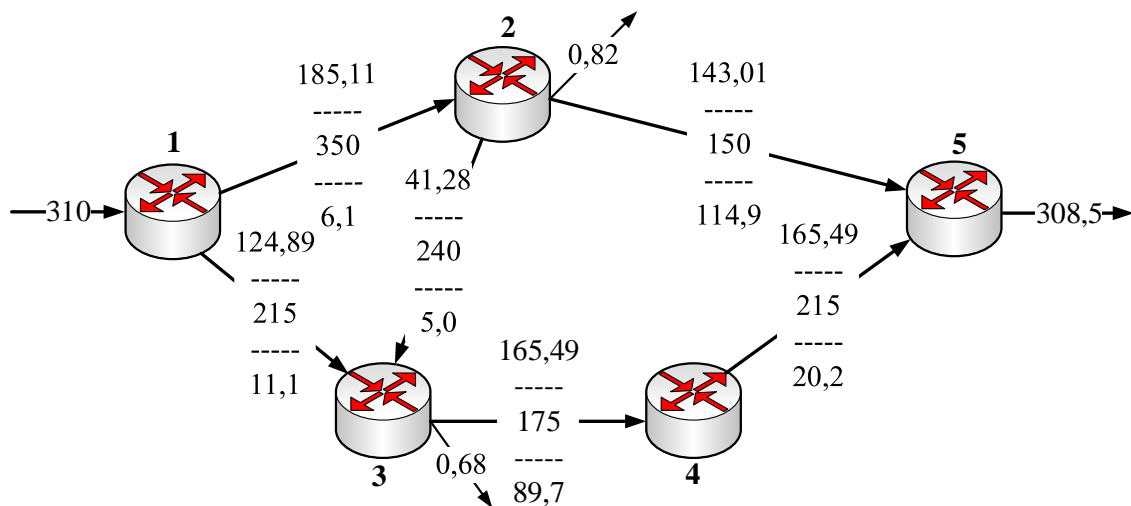


Рис. 4.4. Розв'язання задачі маршрутизації з використанням *моделі 1*



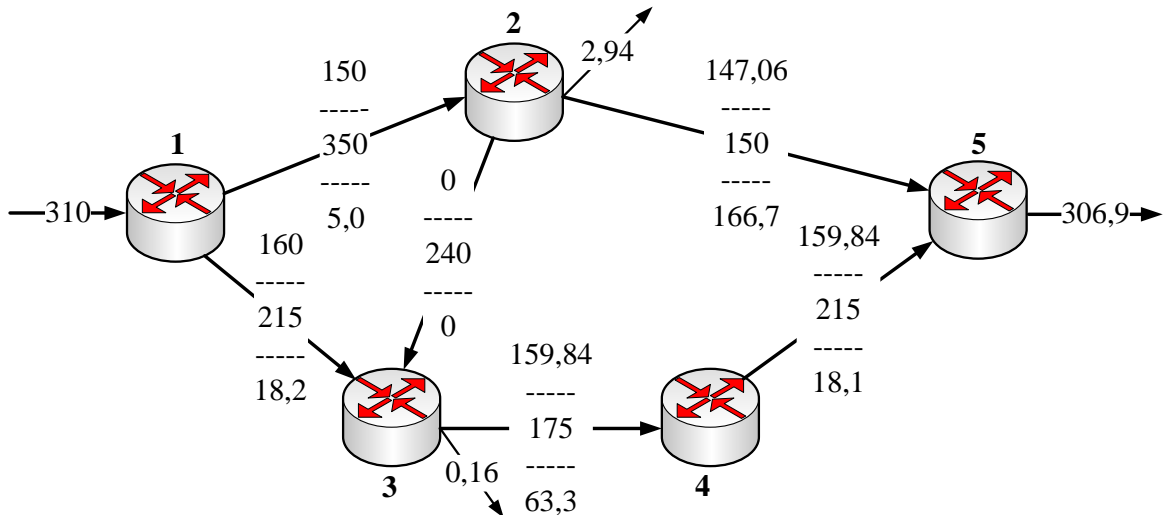


Рис. 4.5. Розв'язання задачі маршрутизації з використанням моделі 2

Унаслідок дослідження для кожної з моделей розраховано три шляхи, характеристики яких представлені в табл. 4.2. Як видно з табл. 4.2, у використанні запропонованої моделі 1 уздовж кожного зі шляхів середня затримка пакетів була однаковою та становила 121 мс, відсоток втрачених пакетів у мережі становив приблизно 0,48. Значення R-фактора, яке оцінювалося за допомогою виразу (4.3), становило 70,22, що відповідало встановленим вимогам щодо рівня QoE ( $R_{\langle \text{вим} \rangle} = 70$ ).

Таблиця 4.2

### Результати порівняльного аналізу моделі 1 та моделі 2

Розраховані шляхи	Модель 1			Модель 2		
	Інтенсивність потоку, 1/с	Середня затримка пакетів, мс	Відсоток втрат пакетів	Інтенсивність потоку, 1/с	Середня затримка пакетів, мс	Відсоток втрат пакетів
1-й шлях: 1→2→5	143,83	121	0,0057	150	171,7	0,0196
2-й шлях: 1→2→3→4→5	41,28	121	0,0041	0	0	0
3-й шлях: 1→3→4→5	124,89	121	0,0041	160	99,6	0,001

У процесі дослідження моделі 2, що базувалась на використанні метрики протоколу EIGRP, середні затримки пакетів уздовж кожного зі шляхів були

різними (табл. 4.2), проте середня міжкінцева затримка пакетів становила 134,15 мс, а відсоток утрачених пакетів у мережі дорівнював 1. Тому R-фактор за умови EIGRP маршрутизації дорівнював 61,7939, що, з одного боку, було на 13,64 % нижче, ніж у моделі 1, а з іншого, – не відповідало умовам поставленого завдання щодо рівня QoE.

Отже, результати дослідження розробленої тензорної моделі QoE-маршрутизації підтвердили її працездатність і адекватність з точки зору забезпечення заданого значення такого QoE-показника, як R-фактор. Результати проведеного порівняльного аналізу запропонованої моделі з потоковою моделлю, основаної на використанні метрики IEGRP, також доводять її ефективність. Залежно від завантаженості мережі вигреш щодо значень R-фактора становив у середньому від 12 % до 25 %. Найбільший вигреш спостерігався в області середніх та високих навантажень (до 25 %). У разі невисокої завантаженості мережі або в режимі роботи, близькому до перевантаження, вигреш щодо значень R-фактора знижувався до 12 %.

#### **4.2.2. Дослідження тензорної моделі QoE-маршрутизації із забезпеченням якості обслуговування за показником R-фактора, представленої в базисі міжполюсних шляхів та внутрішніх вузлових пар**

Для аналізу адекватності та оцінки ефективності розробленої тензорної моделі QoE-маршрутизації із забезпеченням якості обслуговування за R-фактором, яка представлена в базисі міжполюсних шляхів та внутрішніх вузлових пар виразами (2.1)–(2.32), (2.41)–(2.52), (2.75), (4.1)–(4.6) та (4.8), (4.9), було проведено дослідження для двох випадків, у межах яких використовувався критерій оптимальності (2.75). У першому випадку значення інтенсивності потоку, що надходить у мережу, було зафіксовано, а дослідження проводилося для різних вимог щодо значень R-фактора, тобто

$$\lambda^{\langle \text{вим} \rangle} = \text{const} \text{ та } R_{\langle \text{вим} \rangle} = \text{var}.$$

У другому випадку, навпаки, у межах вихідних даних інтенсивність вхідного потоку варіювалась, а рівень QoE-вимог було зафіксовано, тобто

$$\lambda^{\langle \text{вим} \rangle} = \text{var} \text{ та } R_{\langle \text{вим} \rangle} = \text{const} .$$

#### 4.2.2.1. Дослідження впливу зміни вимог щодо значень R-фактора на розв'язання задачі QoE-маршрутизації

У цьому підпункті проведено аналіз впливу зміни вимог щодо рівня QoE на характер маршрутизації VoIP-потоків з постійною інтенсивністю. У межах дисертаційного дослідження використовувався фрагмент телекомунікаційної мережі, який зображений на рис. 4.6. У цьому випадку мережа складалася з 9 маршрутизаторів та 12 каналів зв'язку, у розривах яких вказана їхня пропускна здатність (1/с). Функціонування кожного з інтерфейсів маршрутизаторів моделювалося системою масового обслуговування M/M/1/N, а ємність буфера становила 30 пакетів ( $N = 30$ ).

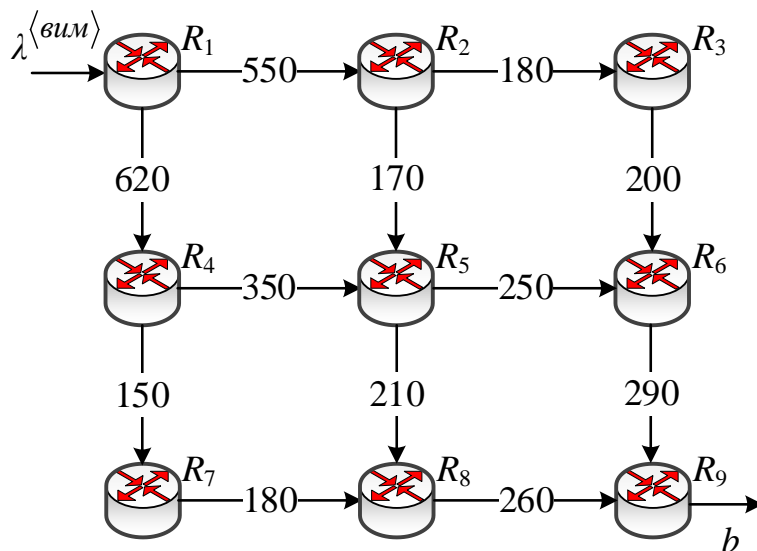


Рис. 4.6. Досліджуваний фрагмент телекомунікаційної мережі

Інтенсивність потоку пакетів, що надходить у мережу на перший маршрутизатор  $R_1$  та призначається для дев'ятого маршрутизатора  $R_9$ , не

змінювалася та становила 350 1/с. Вимоги до рівня QoE задавалися значеннями  $R_{\langle \text{вим} \rangle}$ , які приймали такі значення: 50, 75 та 90 (табл. 4.1).

Для наочності, відповідно до тензорної геометризації мережі, на рис. 4.7 представлено для мережі  $S$  порядок визначення базисних внутрішніх вузлових пар, коли полюсами були вузли  $u_1$  (маршрутизатор  $R_1$ ) та  $u_9$  (маршрутизатор  $R_9$ ), а основні структурні характеристики приймали такі значення:  $n=12$ ,  $\kappa(S)=5$ ,  $\mathcal{G}(S)=7$  (2.2).

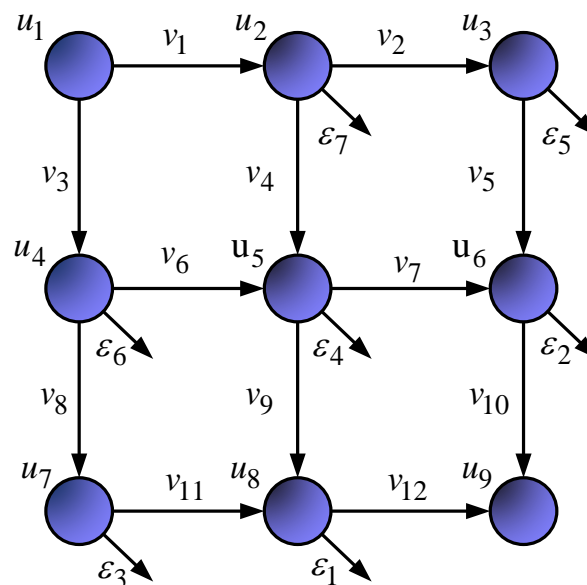


Рис. 4.7. Приклад одновимірної мережі  $S$ , яка моделює структуру телекомунікаційної мережі (рис. 4.6), та визначення базисних внутрішніх вузлових пар

Нехай на структурі мережі (рис. 4.7) базисними були такі міжполюсні шляхи:

$$\gamma_1 : u_1 \rightarrow u_2 \rightarrow u_3 \rightarrow u_6 \rightarrow u_9;$$

$$\gamma_2 : u_1 \rightarrow u_4 \rightarrow u_7 \rightarrow u_8 \rightarrow u_9;$$

$$\gamma_3 : u_1 \rightarrow u_2 \rightarrow u_5 \rightarrow u_6 \rightarrow u_9;$$

$$\gamma_4 : u_1 \rightarrow u_2 \rightarrow u_5 \rightarrow u_8 \rightarrow u_9;$$

$$\gamma_5 : u_1 \rightarrow u_4 \rightarrow u_5 \rightarrow u_8 \rightarrow u_9.$$

На підставі введених базисів отримана матриця коваріантного координатного перетворення  $A$ , яка мала такий вигляд:

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

Характеристики розрахованих шляхів та рівень якості обслуговування, який вони забезпечували за показниками R-фактора, середньої міжкінцевої затримки та відсотка втрат пакетів у ТКМ, детально представлені в табл. 4.3. У результаті розрахунків встановлено, що запропонована модель маршрутизації в ТКМ забезпечувала адаптивне виконання вимог щодо рівня QoS, тобто для всіх трьох випадків розраховані значення R-фактора збігалися з вимогами  $R_{\langle \text{вим} \rangle}$ . Адаптивний характер маршрутних рішень визначався тим, що з підвищенням рівня QoS-вимог збільшувався обсяг задіяного мережного ресурсу, наприклад, кількість використаних шляхів, а відповідно, і ресурс пропускної здатності каналів зв'язку ТКМ. Якщо в разі мінімально допустимих QoS-вимог, тобто коли  $R_{\langle \text{вим} \rangle} = 50$ , необхідно було використати лише два маршрути (табл. 4.3), то за умови  $R_{\langle \text{вим} \rangle} = 75$  було задіяно вже три маршрути. У подальшому зростанні вимог, тобто якщо  $R_{\langle \text{вим} \rangle} = 90$ , було застосовано вже чотири шляхи та відповідний каналний ресурс (табл. 4.3).

Таблиця 4.3

**Характеристики розрахованих шляхів у розв’язанні задачі  
QoE-маршрутизації**

Розраховані шляхи		$\lambda_p, 1/c$	$\tau_p,$ мс	$P_{pl}$	$T_a, мс$	$b, 1/c$
$R = R_{\langle \text{вим} \rangle} = 50$						
1	R1→R4→R5→R6→R9	225,8831	98,8	0,0359	87,3	337,4486
2	R1→R4→R5→R8→R9	111,5655	63,8			
$R = R_{\langle \text{вим} \rangle} = 75$						
1	R1→R2→R3→R6→R9	23,4593	33,2	0,0102	67,7	346,4335
2	R1→R4→R5→R6→R9	215,1730	80,3			
3	R1→R4→R5→R8→R9	107,8011	49,9			
$R = R_{\langle \text{вим} \rangle} = 90$						
1	R1→R2→R3→R6→R9	28,8131	30,8	0,0015	49,4	349,4754
2	R1→R2→R5→R6→R9	21,013	45,1			
3	R1→R4→R5→R6→R9	179,4199	58,7			
4	R1→R4→R5→R8→R9	120,2294	40,6			

**4.2.2.2. Аналіз впливу завантаженості мережі на рішення розв’язання задачі QoE-маршрутизації**

Для оцінки ефективності розробленої тензорної моделі QoE-маршрутизації із забезпеченням якості обслуговування за R-фактором, яка представлена виразами (2.1)–(2.32), (2.41)–(2.52), (2.75), (4.1)–(4.6) та (4.8), (4.9), проведено аналіз впливу завантаженості ТКМ на характер маршрутних рішень. Моделювався випадок, коли варіювалась інтенсивність вхідного потоку, а вимоги щодо значень R-фактора були зафіксовані, тобто  $\lambda^{\langle \text{вим} \rangle} = \text{var}$ , а  $R_{\langle \text{вим} \rangle} = \text{const}$ .

Так, для цього дослідження використано вхідні дані, які наведені в підпункті 4.2.2.1. Досліджуваний фрагмент ТКМ із вказаними пропусковими здатностями каналів зв'язку, маршрутизаторами відправником та отримувачем, зображено на рис. 4.6. На відміну від дослідження, представленого в підпункті 4.2.2.1, інтенсивність вхідного потоку пакетів змінювалася від 200 до 380 пакетів за секунду із кроком 5 1/с, тобто загалом досліджувалося 37 випадків. Вимоги до значень R-фактора були зафіксовані, тобто  $R_{\langle \text{вим} \rangle} = 90$ , що, відповідно до табл. 4.1, характеризує випадок, коли користувачі дуже задоволені якістю надання послуг. Результати розрахунків, представлені кількістю та характеристиками шляхів у ТКМ, наведено в табл. 4.4.

Таблиця 4.4

#### Характеристики розрахованих шляхів за умови QoS-маршрутизації

Варіанти	Інтенсивність потоку пакетів $\lambda_{\langle \text{вим} \rangle}$ , 1/с	Значення R-фактора	Кількість шляхів	Номер шляху	Розраховані шляхи
1	200	92,65	1	1	R1→R4→R5→R6→R9
2	205	92,16	1	1	R1→R4→R5→R6→R9
3	210	91,3	1	1	R1→R4→R5→R6→R9
4÷19	215–290	90	2	1	R1→R4→R5→R6→R9
				2	R1→R4→R5→R8→R9
20	295	90	3	1	R1→R4→R7→R8→R9
				2	R1→R4→R5→R6→R9
				3	R1→R4→R5→R8→R9
21÷26	300–325	90	3	1	R1→R2→R3→R6→R9
				2	R1→R4→R5→R6→R9
				3	R1→R4→R5→R8→R9
27÷37	330–380	90	4	1	R1→R2→R3→R6→R9
				2	R1→R2→R5→R6→R9
				3	R1→R4→R5→R6→R9
				4	R1→R4→R5→R8→R9

Отже, зазначимо, що для забезпечення заданого значення R-фактора в умовах зростання інтенсивності вхідного потоку, адаптивно змінювався обсяг мережного ресурсу, що використовувався, а саме кількість маршрутів в умовах багатошляхової маршрутизації із балансуванням трафіка вздовж них. Цю залежність кількості використовуваних маршрутів від інтенсивності для наочності представлено на рис. 4.8.

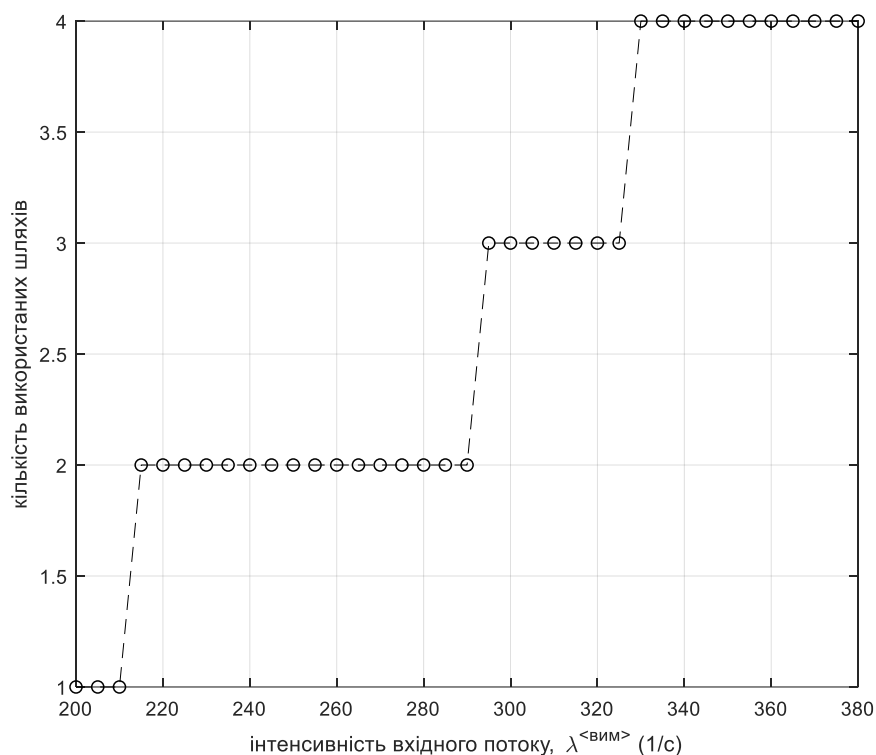


Рис. 4.8. Залежність кількості шляхів, що використовується в ході QoE-маршрутизації, від інтенсивності VoIP-потoku пакетів

#### 4.2.2.3. Аналіз процесів QoE-маршрутизації в умовах диференційованого забезпечення якості обслуговування за показником R-фактора

У дослідженні процесів диференційованого забезпечення якості обслуговування за показником R-фактора було використано структуру ТКМ,



яка представлена на рис. 4.6, у якій між маршрутизаторами  $R_1$  та  $R_9$  передавалися пакети двох VoIP-потоків з інтенсивностями  $\lambda_1^{\langle \text{вим} \rangle}$  і  $\lambda_2^{\langle \text{вим} \rangle}$ . Для розрахунку маршрутів було застосовано модель QoE-маршрутизації (2.1)–(2.32), (2.41)–(2.52), (2.75), (4.1), (4.3)–(4.6) та (4.8), (4.9) у разі використання критерію оптимальності (4.10). Аналізувався вплив значень пріоритетів (класів) VoIP-потоків, тобто значень вагової функції  $f(pr^1)$  та  $f(pr^2)$ , на відповідні величини R-фактора –  $R^1$  та  $R^2$ . Результати аналізу представлені в табл. 4.5. Для наочності результати розрахунку маршрутів та їхні характеристики для випадку співвідношення  $f(pr^1)$  до  $f(pr^2)$  як 20 до 1 (табл. 4.5) більш детально описані в додатку Б.2.

Таблиця 4.5

**Результати аналізу впливу пріоритетів (класів) VoIP-потоків на величини R-фактора для кожного з потоків**

Співвідношення $f(pr^1)$ до $f(pr^2)$	$\lambda_1^{\langle \text{вим} \rangle} = 180$ 1/с	$\lambda_2^{\langle \text{вим} \rangle} = 300$ 1/с
	$R^1$	$R^2$
50 : 1	92,9592	62,6734
20 : 1	92,6284	72,8256
10 : 1	92,2197	78,6728
7 : 1	91,9373	81,0353
5 : 1	91,6217	82,9028
1 : 1	89,4479	87,9806

Як показано в табл. 4.5, зі збільшенням відношення значень вагових функцій  $f(pr^1)$  та  $f(pr^2)$ , що відповідали за пріоритети (класи) VoIP-потоків у критерії оптимальності (4.10), величина  $R^1$  збільшувала своє значення щодо

$R^2$ , тобто збільшення класу VoIP-потіку призводило до підвищення якості обслуговування на рівні кінцевого користувача. Відповідно до того, як вирівнювалося співвідношення між  $f(pr^1)$  і  $f(pr^2)$ , диференціація в значеннях R-факторів  $R^1$  та  $R^2$  слабшала. Так, за умови  $f(pr^1) = f(pr^2)$  значення  $R^1$  та  $R^2$  були максимально близькими й становили 89,4479 та 87,9806. Різниця в цих значеннях визначалася тим, що другий VoIP-потік пакетів навантажував ТКМ більшою мірою, оскільки мав більшу інтенсивність ( $\lambda_2^{\langle \text{вим} \rangle} = 300$  1/с), аніж перший VoIP-потік ( $\lambda_1^{\langle \text{вим} \rangle} = 180$  1/с). У процесі вирівнювання інтенсивностей та класів обох потоків, наприклад, коли  $\lambda_1^{\langle \text{вим} \rangle} = \lambda_2^{\langle \text{вим} \rangle} = 240$  1/с та  $f(pr^1) = f(pr^2)$ , значення R-факторів для обох VoIP-потоків збігалися –  $R^1 = R^2 = 88,625$ .

Отже, отримані результати дослідження підтвердили адекватність тензорної моделі QoE-маршрутизації (2.1)–(2.32), (2.41)–(2.52), (2.75), (4.1), (4.3)–(4.6) та (4.8)–(4.10) щодо диференційованого забезпечення якості обслуговування на рівні кінцевого користувача за показником R-фактора. Продемонстровано, що за допомогою зміни співвідношення між значеннями  $f(pr^k)$  можна регулювати порядок балансування навантаження в ході розв’язання задачі QoE-маршрутизації, диференційовано підвищуючи або знижуючи значення R-фактора для того чи іншого VoIP-потіку залежно від його пріоритету (класу) (табл. Б.1 та Б.2). На практиці вибір конкретного числового значення співвідношення між  $f(pr^k)$  для різних VoIP-потоків буде покладатися на відповідний маршрутний протокол.

#### 4.2.2.4. Порівняльний аналіз запропонованого та відомих технологічних рішень задачі QoE-маршрутизації VoIP-потoku

У процесі дослідження за величиною R-фактора порівнювалися три рішення задачі QoE-маршрутизації:

- тензорна модель QoE-маршрутизації (2.1)–(2.32), (2.41)–(2.52), (2.75), (4.1), (4.3)–(4.6) та (4.8)–(4.10);
- модель TE: модель маршрутизації (2.64)–(2.67), (2.76), (2.77), яка побудована відповідно до принципів технології Traffic Engineering (TE);
- EIGRP модель: модель маршрутизації (2.64)–(2.66), (2.75), яка використовує метрику протоколу EIGRP.

Моделювався однопотоковий випадок, коли на структурі мережі (рис. 4.6) передавалися між маршрутизаторами  $R_1$  та  $R_9$  пакети одного VoIP-потoku з інтенсивністю  $\lambda^{\langle \text{вим} \rangle}$ , яка, для прикладу, змінювалася від 300 до 550 1/с. На рис. 4.9 показані значення R-фактора, отримувані в процесі використання перелічених трьох рішень, та кольоровими відтінками виділено рівні задоволеності кінцевих користувачів відповідно до змісту табл. 4.1.

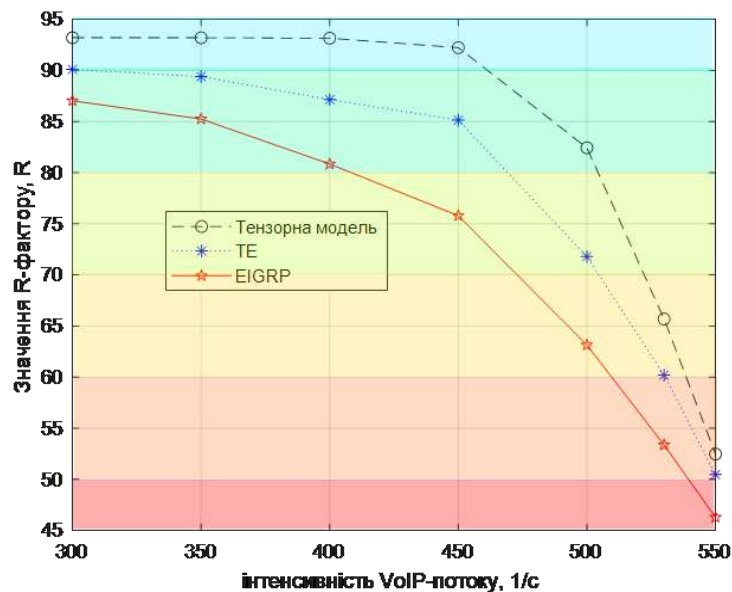


Рис. 4.9. Залежність R-фактора від інтенсивності VoIP-потoku за умови різних моделей маршрутизації

На рис. 4.10 показано вигреш щодо значень R-фактора від використання запропонованої тензорної моделі QoE-маршрутизації порівняно з моделями TE та EIGRP.

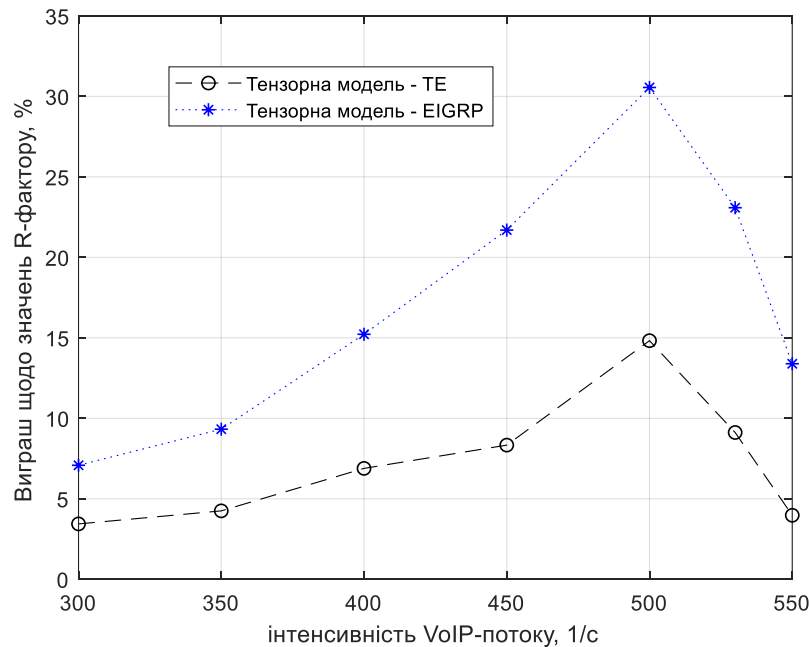


Рис. 4.10. Вигреш щодо значень R-фактора від використання запропонованої тензорної моделі QoE-маршрутизації порівняно з моделями TE та EIGRP

Як показано на рис. 4.9 та 4.10, в області невисоких навантажень ( $\lambda^{\langle \text{вим} \rangle} = 300 \div 400$  1/с) мережного ресурсу вистачало для забезпечення досить високого рівня QoE за умови використання кожної з досліджуваних моделей маршрутизації. Вигреш від застосування запропонованої моделі становив від 7 % до 15 % порівняно з моделлю EIGRP та від 4 % до 7 % порівняно з TE-рішенням.

В області високого навантаження ( $\lambda^{\langle \text{вим} \rangle} = 400 \div 500$  1/с) вигреш становим від 15 до 31% у порівнянні з моделлю EIGRP та від 7 до 15% порівняно з TE-рішенням. У режимі роботи ТКМ, близькому до перевантаження ( $\lambda^{\langle \text{вим} \rangle} = 500 \div 550$  1/с), значення R-фактора для всіх моделей

маршрутизації різко знижувалися. Виграш від використання запропонованого в роботі рішення становив від 13 % до 31 % порівняно з моделлю EIGRP та від 4 % до 15 % порівняно з TE моделлю. Отримані результати дослідження визначають напрям використання запропонованої моделі QoE-маршрутизації, коли спостерігається нестача мережного ресурсу, викликана або його економією, або високим завантаженням.

### **4.3. Тензорні моделі швидкої перемаршрутизації із забезпеченням якості обслуговування за показником R-фактора**

У цьому підрозділі основну увагу приділено вирішенню важливого науково-прикладного завдання щодо забезпечення захисту рівня QoE за показником R-фактора в процесі реалізації швидкої перемаршрутизації, що на практиці має важливе місце для обслуговування мовного трафіка (трафіка VoIP). Тож, відповідно до табл. 1.10, у цьому підрозділі представлено реалізацію схеми QoE-FRR за показником R-фактора, яка передбачає розроблення системи математичних моделей швидкої перемаршрутизації трафіка даних із захистом рівня якості сприйняття послуг, що надаються кінцевим користувачам у ТКМ.

#### **4.3.1. Опис тензорних моделей швидкої перемаршрутизації із забезпеченням якості обслуговування за показником рейтингу якості**

Для захисту рівня QoE за показником R-фактора в умовах швидкої перемаршрутизації в телекомунікаційній мережі за основу використано потокову модель (3.1)–(3.13), представлену в пунктах 3.1.1 та 3.1.2. Тобто для реалізації схеми QoE-FRR (табл.1.10) у мережі необхідно також забезпечити розрахунок двох типів маршрутних змінних  $x_{i,j}^k$  та  $\bar{x}_{i,j}^k$ , кожна з яких характеризує частку інтенсивності  $k$ -го потоку, що направляєється з вузла  $u_i$  до

вузла  $u_j$  через канал  $(i, j)$ , який входить до основного або резервного маршруту відповідно. У межах тензорної моделі, представлені виразами (3.1)–(3.13), обмеженнями у використанні основного та резервного маршрутів були:

- умови реалізації одно- та багатошляхової стратегії маршрутизації (2.63), (2.64), (3.1);
- умови збереження потоку (2.71), (3.2);
- умови захисту каналу, вузла та маршруту (3.8)–(3.10);
- умови реалізації схеми захисту пропускнуої здатності мережі (3.11);
- умови реалізації схеми захисту значень імовірності втрат пакетів під час реалізації швидкої перемаршрутизації (3.12) та (3.13).

Крім моделі (3.1)–(3.13), розроблена тензорна модель містить умови захисту рівня QoE за показником R-фактора. Умови для основного маршруту в ТКМ представлені виразами (4.2) з урахуванням (4.3)–(4.6). Для резервного маршруту ці умови мають аналогічний вигляд:

$$\bar{R} \geq R_{\langle \text{eum} \rangle}, \text{ якщо } \bar{R} = R_0 - I_{dd}(\bar{T}_a) - I_{e\text{-eff}}(\bar{P}_{pl}), \quad (4.13)$$

де  $I_{dd}(\bar{T}_a)$  – коефіцієнти зниження якості, обумовленого тривалою середньою міжкінцевою затримкою пакетів ( $\bar{T}_a$ ) у мережі вздовж резервного маршруту;

$I_{e\text{-eff}}(\bar{P}_{pl})$  – коефіцієнти зниження якості, викликаного втратами мовних пакетів на вузлах за умови використання резервного маршруту;

$\bar{P}_{pl}$  – відсоток втрачених пакетів у мережі під час використання резервного маршруту.

Тоді, відповідно до рекомендацій [164, 165, 174], аналогічно, як і для основного (4.5), (4.6), для резервного маршруту коефіцієнти  $I_{dd}(\bar{T}_a)$  та  $I_{e\text{-eff}}(\bar{P}_{pl})$  визначаються такими виразами, як:

$$I_{dd}(\bar{T}_a) = \begin{cases} 0, & \bar{T}_a \leq 100 \text{ мс}; \\ 25 \left[ \left(1 + \bar{X}^6\right)^{\frac{1}{6}} - 3 \left(1 + \left[\frac{\bar{X}}{3}\right]^6\right)^{\frac{1}{6}} + 2 \right], & \bar{T}_a > 100 \text{ мс}; \end{cases} \quad (4.14)$$

$$I_{e-eff}(\bar{P}_{pl}) = I_e + (95 - I_e) \frac{\bar{P}_{pl}}{\frac{\bar{P}_{pl}}{BurstR} + B_{pl}}, \quad (4.15)$$

де  $\bar{X} = \lg \frac{\left(\frac{\bar{T}_a}{100}\right)}{\lg 2}$ .

Тоді загальний підхід до забезпечення якості обслуговування за показником R-фактора в умовах реалізації швидкої перемаршрутизації можна представити у вигляді схеми, зображеної на рис. 4.11.

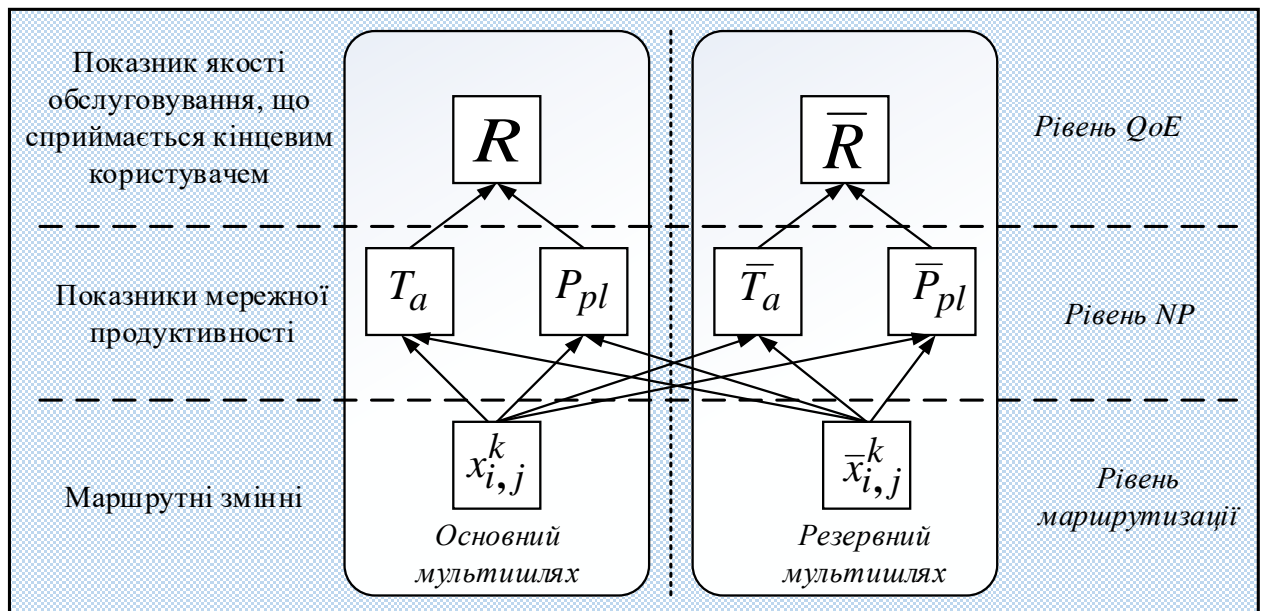


Рис. 4.11. Функціональна ієрархія залежності показників QoE, NP та маршрутних змінних за умови швидкої перемаршрутизації VoIP-трафіка в ТКМ

Як для забезпечення виконання умов (4.2), так і (4.13) необхідно здійснити аналітичний розрахунок значень R-фактора вздовж резервного мультишляху (рис. 4.11), що в загальному випадку залежать від маршрутних змінних (2.64), (3.1), характеристик трафіка, параметрів мережі, а головне – від значень середньої міжкінцевої затримки  $\bar{T}_a$  (мс) та відсотка втрачених пакетів  $\bar{P}_{pl}$ . Для цього, як і в підрозділі 4.1, варто скористатися функціоналом тензорного моделювання процесів маршрутизації в телекомунікаційних мережах. Проте залежно від типу використаної тензорної моделі ТКМ, як показано в підрозділах 3.3 та 4.1, шукані математичні вирази для розрахунку середньої міжкінцевої затримки пакетів  $\bar{T}_a$  матимуть різний вигляд.

У випадку використання тензорної моделі ТКМ, представленої в базисі контурів та вузлових пар, для розрахунку множини резервних шляхів у ТКМ в рамках тензорної геометризації ТКМ застосовуватиметься простір, у якому будуть виключені мережні елементи (вузли та канали), що підлягають захисту. Наприклад, у межах тензорного представлення мережі під час розрахунку резервного мультишляху в умовах захисту будь-якого вузла мережі будуть виключені всі шляхи, які проходять через цей вузол та інцидентні йому канали зв'язку.

Зважаючи на такі особливості тензорної формалізації (4.7), у процесі використання резервного маршруту в ТКМ для розрахунку середньої міжкінцевої затримки  $\bar{T}_a$  пропонується використовувати такий вираз:

$$\bar{T}_a = \frac{\lambda^{\langle vim \rangle} \bar{b} - \bar{G}_{\pi\eta}^{\langle 4,2 \rangle} \left[ \bar{G}_{\pi\eta}^{\langle 4,4 \rangle} \right]^{-1} \bar{\Lambda}_{\eta-1}}{\left( \bar{G}_{\pi\eta}^{\langle 4,1 \rangle} - \bar{G}_{\pi\eta}^{\langle 4,2 \rangle} \left[ \bar{G}_{\pi\eta}^{\langle 4,4 \rangle} \right]^{-1} \bar{G}_{\pi\eta}^{\langle 4,3 \rangle} \right)} \cdot 1000, \quad (4.16)$$



якщо  $\bar{T}_\pi = 0$ , де параметри, які входять у вираз (4.16), детально описані в пункті 3.3.1. Відсоток втрачених пакетів  $\bar{P}_{pl}$  за аналогією з (3.13) та (4.8) буде розраховуватися за таким виразом:

$$\bar{P}_{pl} = (1 - \bar{b}^k) \cdot 100\% . \quad (4.17)$$

У використанні тензорної моделі ТКМ, представленої в базисі міжполюсних шляхів та внутрішніх вузлових пар, для розрахунку середньої міжкінцевої затримки та відсотка втрат пакетів з метою визначення R-фактора в умовах реалізації стратегії швидкої QoE-перемаршрутизації може бути використано підхід, детально описаний у підрозділах 2.4, 4.1 та пункті 3.3.2. Так, за умови використання резервного маршруту розрахунок середньої міжкінцевої затримки здійснюватиметься за допомогою виразу

$$\bar{T}_a = \frac{1000}{\lambda_k^{(вим)} b^k} \left( \bar{\Lambda}_\gamma^t \bar{E}_{\gamma\varepsilon}^{(1)} \bar{\Lambda}_\gamma + \bar{\Lambda}_\gamma^t \bar{E}_{\gamma\varepsilon}^{(2)} \bar{\Lambda}_\varepsilon \right). \quad (4.18)$$

Відсоток втрачених пакетів  $\bar{P}_{pl}$  уздовж резервного мультишляху, як і раніше, буде розраховуватися за допомогою виразу (4.17). У процесі використанні тензорної моделі ТКМ, представленої в базисі міжполюсних шляхів та внутрішніх вузлових пар, у розв'язанні задачі швидкої QoE-маршрутизації можна реалізувати схеми захисту не тільки каналу (3.8) та вузла (3.9), але й маршруту (3.10). Це пов'язано з тим, що на етапі геометризації структури ТКМ не виключаються елементи мережі, які підлягають захисту.

Для розв'язання задачі швидкої QoE-перемаршрутизації як критерій оптимальності отримуваних рішень може застосовуватися, наприклад, аналог умови (3.14), пов'язаної з максимізацією загальної продуктивності телекомунікаційної мережі:

$$J = \sum_{k \in K} (pr^k b^k + \overline{pr}^k \overline{b}^k) \rightarrow \max, \quad (4.19)$$

де  $\overline{pr}^k$ , як значення пріоритету  $k$ -го потоку вздовж резервного шляху, має бути не більшим за пріоритет  $pr^k$ , тобто  $pr^k \geq \overline{pr}^k$ . Це необхідно для того, щоб рівень QoE для  $k$ -го потоку за умови використання ним основного маршруту був не гіршим за рівень QoE для цього ж потоку, коли використано резервний шлях.

У використанні маршрутних метрик, за аналогією до (2.75), як критерій оптимальності може застосовуватися мінімум виразу

$$J = \sum_{k \in K} \sum_{w_{i,j} \in W} h_{i,j}^x \lambda_k^{\langle \text{вим} \rangle} (x_{i,j}^k + \overline{x}_{i,j}^k), \quad (4.20)$$

де  $h_{i,j}^x$  – маршрутна метрика каналу зв'язку, який з'єднує  $i$ -й та  $j$ -й маршрутизатори ТКМ, що відображає ті чи інші функціональні параметри цього каналу.

У корпоративних територіально-розподілених ТКМ, за аналогією з (4.10), доцільно використати критерій вигляду

$$J = \sum_{k \in K} \left( f(pr^k) R^k + f(\overline{pr}^k) \overline{R}^k \right) \rightarrow \max, \quad (4.21)$$

у якому  $f(\overline{pr}^k)$  – вагова лінійно або нелінійно зростаюча функція від значень IP-пріоритету (класу)  $k$ -го VoIP-потоків за умови його маршрутизації резервним шляхом. Використання критерію (4.20) спрямовує на

диференційоване підвищення рівня QoE за показником R-фактора VoIP-потокам шляхом перерозподілу мережного ресурсу (без його економії) та балансування навантаження як уздовж основних, так і резервних мультишляхів.

Отже, задачу швидкої QoE-перемаршрутизації було сформульовано в оптимізаційній формі, де як критерії оптимальності використовувались умови (4.19)–(4.21). Як обмеження для двох типів тензорних моделей загальними умовами, що накладалися на маршрутні змінні, були умови реалізації одно- або багатошляхової маршрутизації (2.63), (2.64), (3.1), умови збереження потоку (2.71), (3.2), умови запобігання перевантаженню каналів зв'язку (2.66), (3.3), умови захисту каналу (3.8), вузла (3.9) та маршруту (3.10), умови забезпечення захисту рівня якості сприйняття послуг, що надаються кінцевим користувачам за показником R-фактора (4.2), (4.13) в процесі використання основного та резервного маршрутів відповідно. Нелінійність більшості обмежень, наприклад (2.71), (3.2), (3.10) та (4.2), (4.13), дозволяє визначити сформульовану оптимізаційну задачу як таку, що належить до класу задач нелінійного програмування. Крім того, у разі реалізації одношляхової маршрутизації, коли маршрутні змінні приймали лише булеві значення (2.63), оптимізаційна задача належала класу змішаного цілочисельного нелінійного програмування (Mixed Integer Nonlinear Programming, MINLP).

#### **4.4. Дослідження запропонованих моделей QoE-перемаршрутизації із забезпеченням якості обслуговування за показником R-фактора**

##### **4.4.1. Дослідження тензорної моделі швидкої перемаршрутизації із забезпеченням якості обслуговування за показником R-фактора, представленої в базисі контурів та вузлових пар**

Дослідження тензорної моделі швидкої QoE-перемаршрутизації із забезпеченням якості сприйняття послуг, що надаються кінцевим користувачам за показником R-фактора, яка представлена виразами (2.64), (2.66), (2.71), (3.1)–

(3.7), (3.11), (4.2)–(4.8), (4.13)–(4.17) з критерієм оптимальності (4.19), проводилося на прикладі структури телекомунікаційної мережі, зображеної на рис. 4.12. ТКМ складалася з шести маршрутизаторів та восьми каналів зв'язку.

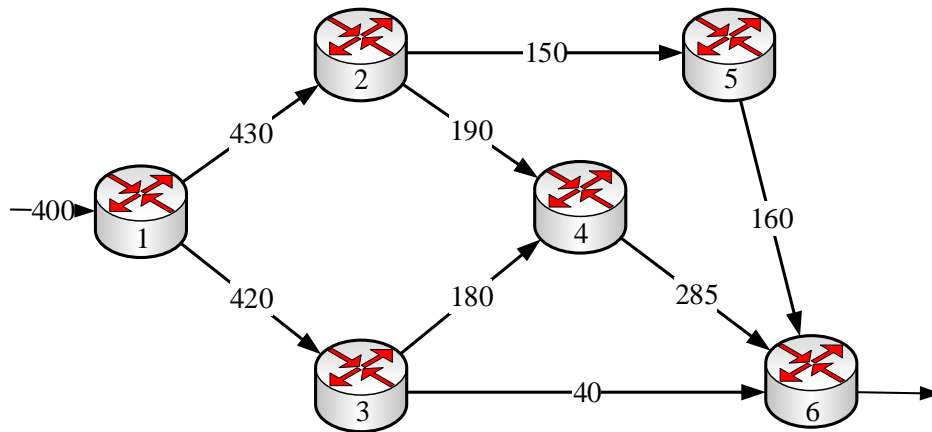
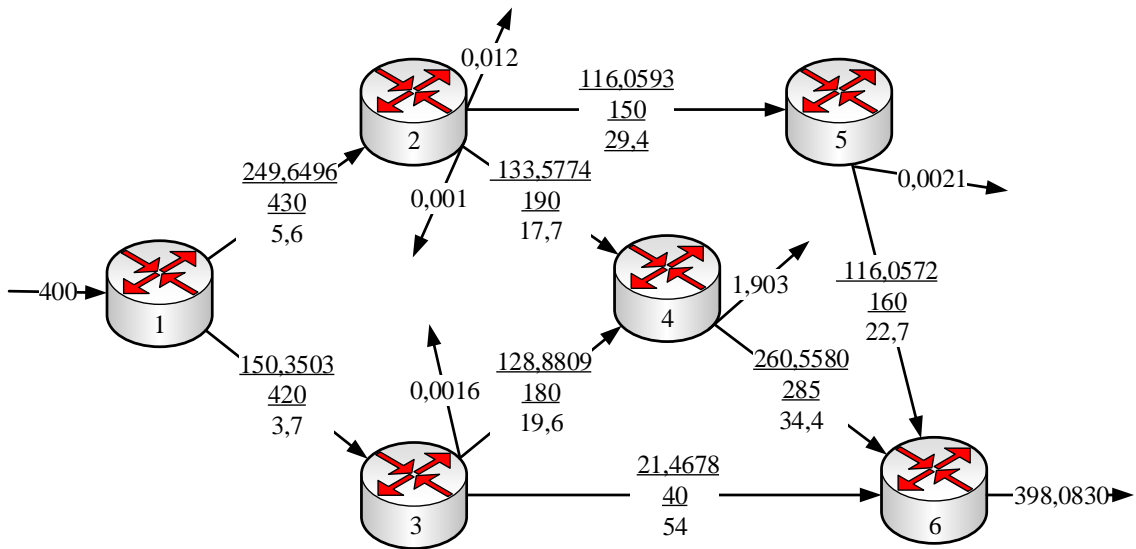


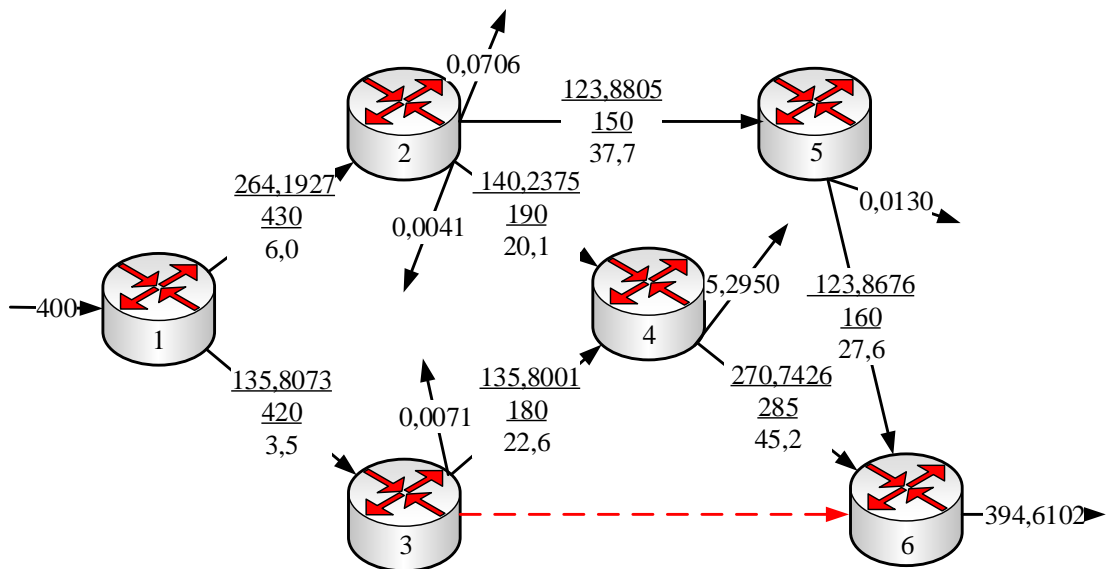
Рис. 4.12. Структура досліджуваної телекомунікаційної мережі

Робота мережних інтерфейсів маршрутизаторів моделювалася системою масового обслуговування з відмовами типу  $M/M/1/N$ . Ємність буфера становила 30 пакетів. Інтенсивність потоку, що надходить у мережу на перший маршрутизатор і призначений для шостого маршрутизатора, становила 400 1/с, а вимоги до рівня QoE задавалися рейтингом якості  $R_{\langle \text{вим} \rangle} = 70$ , яким, згідно з рекомендаціями ITU-T G.107 [176], деякі користувачі не будуть задоволені (табл. 4.1). Нехай у процесі швидкої QoE-перемаршрутизації, наприклад, потрібно було захистити канал зв'язку між третім і шостим маршрутизаторами.

Результати розрахунків, що визначають порядок швидкої перемаршрутизації в ТКМ, представлені на рис. 4.13. На цих рисунках у розривах каналів зв'язку вказані (зверху донизу): інтенсивність потоку пакетів у цьому каналі зв'язку (1/с), пропускна здатність (1/с) та середня затримка пакетів у каналі (мс).



а) порядок маршрутизації потоку пакетів, які передаються основним  
мультишляхом



б) порядок маршрутизації потоку пакетів, які передаються резервним  
мультишляхом

Рис. 4.13. Результат розв'язання задачі швидкої QoS-перемаршрутизації із забезпеченням якості обслуговування за показником R-фактора

У табл. 4.6 наведені рейтинги якості для основного ( $R$ ) та резервного ( $\bar{R}$ ) мультишляхів із зазначенням відповідних показників мережної продуктивності: середніх міжкінцевих затримок  $T_a$  і  $\bar{T}_a$  та рівня втрат пакетів  $P_{pl}$  та  $\bar{P}_{pl}$ .

Таблиця 4.6

**Оцінка рівня QoE за показником R-фактора розв'язань задачі швидкої перемаршрутизації**

Значення R-фактора (рейтингу якості)	
Рекомендоване значення R-фактора	$R_{\langle \text{вим} \rangle} = 70$
R-фактор за умови використання основного мультишляху	$R = 83,6737$ (якщо $T_a = 57,7$ мс та $P_{pl} = 0,48\%$ )
R-фактор за умови використання резервного мультишляху	$\bar{R} = 70,5335$ (якщо $\bar{T}_a = 71,3$ мс та $\bar{P}_{pl} = 1,35\%$ )

Згідно з отриманими результатами розрахунків, представленими на рис. 4.13 і в табл. 4.6, з використання запропонованої тензорної моделі (2.64), (2.66), (2.71), (3.1)–(3.7), (3.11), (4.2)–(4.8), (4.13)–(4.17), (4.19) вдалося успішно розв'язати задачу швидкої перемаршрутизації із забезпеченням захисту, по-перше, каналу між маршрутизаторами  $R_3$  та  $R_6$ , а по-друге, заданого рівня QoE за показником R-фактора. Значення рейтингу якості в процесі використання як основного, так і резервного мультишляхів (табл. 4.6) було не гірше за встановлене значення ( $R_{\langle \text{вим} \rangle} = 70$ ), тобто умови (4.2) та (4.13) виконувалися.

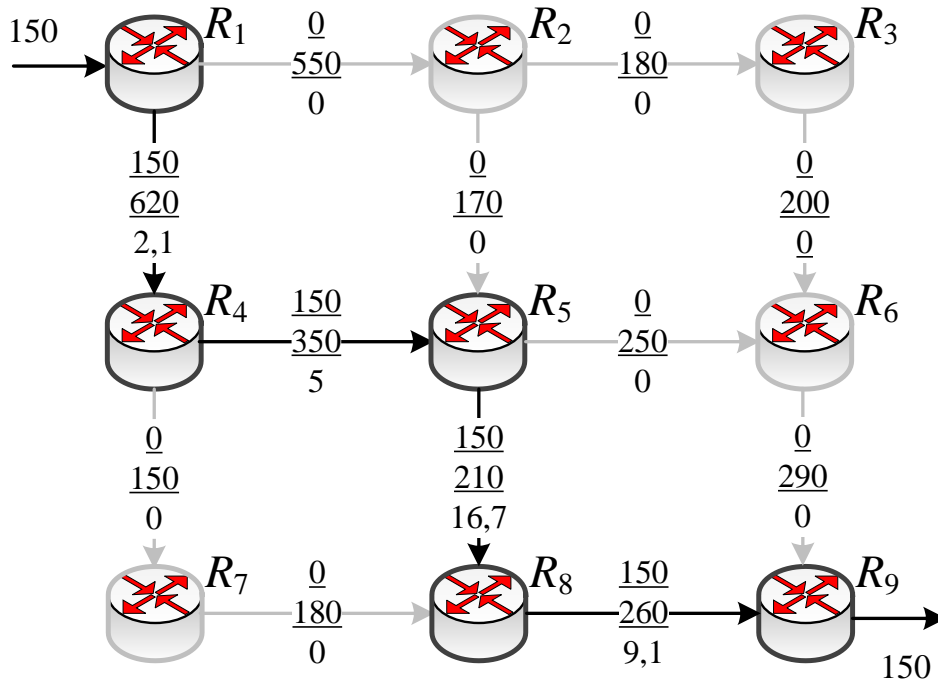
Отже, наведений розрахунковий приклад дозволив дослідити процес швидкої перемаршрутизації із захистом рівня QoE за показником R-фактора вздовж основного та резервного маршрутів, що підтвердило адекватність та ефективність запропонованої тензорної моделі.

#### 4.4.2. Дослідження тензорної моделі швидкої перемаршрутизації із забезпеченням якості обслуговування за показником R-фактора, представленої в базисі міжполюсних шляхів та внутрішніх вузлових пар

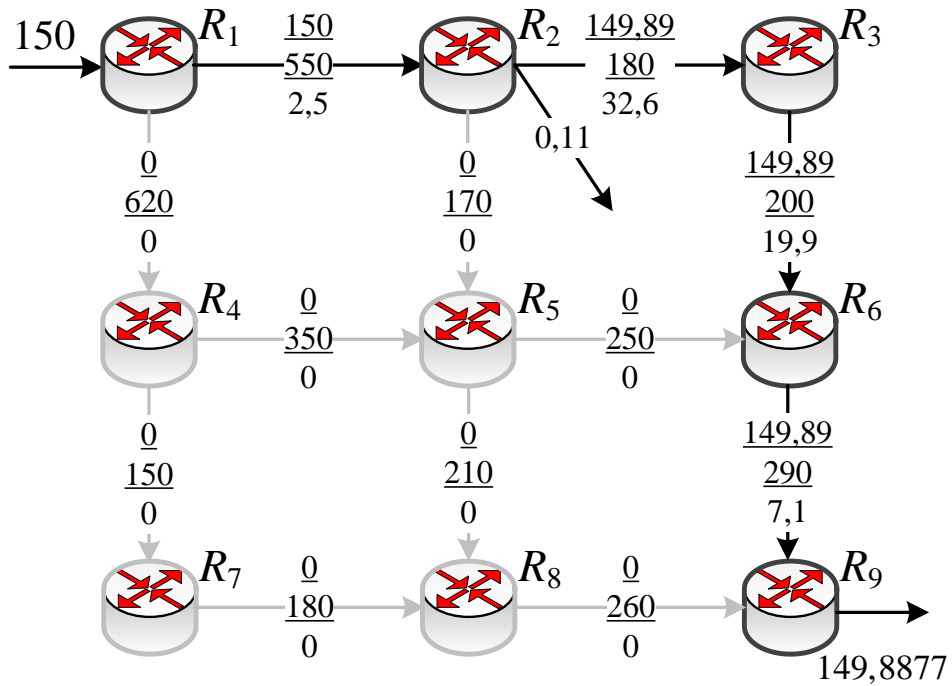
Для оцінки ефективності, описаної в підрозділі 4.3 тензорної моделі швидкої QoE-перемаршрутизації, представленої виразами (2.64), (2.66), (2.71), (3.1)–(3.11), (4.2)–(4.6), (4.8), (4.9), (4.13)–(4.15), (4.17), (4.18) з критерієм оптимальності (4.20), проведено дослідження на фрагменті телекомунікаційної мережі, зображеному на рис. 4.6. У цьому випадку мережа складалася з 9 маршрутизаторів та 12 каналів зв'язку із зазначеною в розривах їхньою пропускною здатністю (1/с). Функціонування кожного з інтерфейсів маршрутизаторів моделювалося системою масового обслуговування M/M/1/N, а ємність буфера становила 30 пакетів ( $N = 30$ ).

Інтенсивність VoIP-потoku пакетів, що надходив у мережу на маршрутизатор  $R_1$  та призначався маршрутизатору  $R_9$ , становила 150 1/с. Нехай у ході швидкої перемаршрутизації необхідно було реалізувати схеми захисту шляху та рівня QoE, коли  $R_{\langle \text{вим} \rangle} = 90$ . Тоді на рис. 4.14 показано порядок швидкої QoE-перемаршрутизації одного VoIP-потoku з використанням основного (рис. 4.14 а) та резервного (рис. 4.14 б) маршрутів. На цьому рисунку в розривах каналів зв'язку вказані (зверху донизу): інтенсивність потoku в даному каналі зв'язку (1/с), пропускна здатність (1/с) та середня затримка пакетів у каналі (мс).

Більш детально характеристики розрахованих шляхів (основного та резервного) наведені в додатку Б.3. Там також зауважено, що значення R-фактора в процесі використання основного маршруту становило  $R = 93,1739$ , а в разі застосування резервного шляху –  $\bar{R} = 91,5749$ , що відповідало встановленим вимогам ( $R_{\langle \text{вим} \rangle} = 90$ ).



а) порядок маршрутизації потоку пакетів, які передаються за основним шляхом



б) порядок маршрутизації потоку пакетів, які передаються за резервним шляхом

Рис. 4.14. Порядок швидкої QoS-перемаршрутизації одного VoIP-потoku



До того ж основний шлях з резервним не перетинався, тобто всі необхідні схеми захисту були реалізовані в повному обсязі.

#### 4.5. Тензорні моделі QoE-маршрутизації із забезпеченням мультимедійної якості

Обслуговування в ТКМ мультимедійного трафіка, який передбачає передачу пакетів як аудіо-, так і відеопотоків, є досить складним технологічним завданням, вирішення якого має ґрунтуватися на погодженій та скоординованій роботі багатьох технологій та окремих протоколів усіх семи рівнів OSI. Водночас окремим аспектом цього завдання є контроль за якістю обслуговування на рівні кінцевого користувача (рис. 4.15).

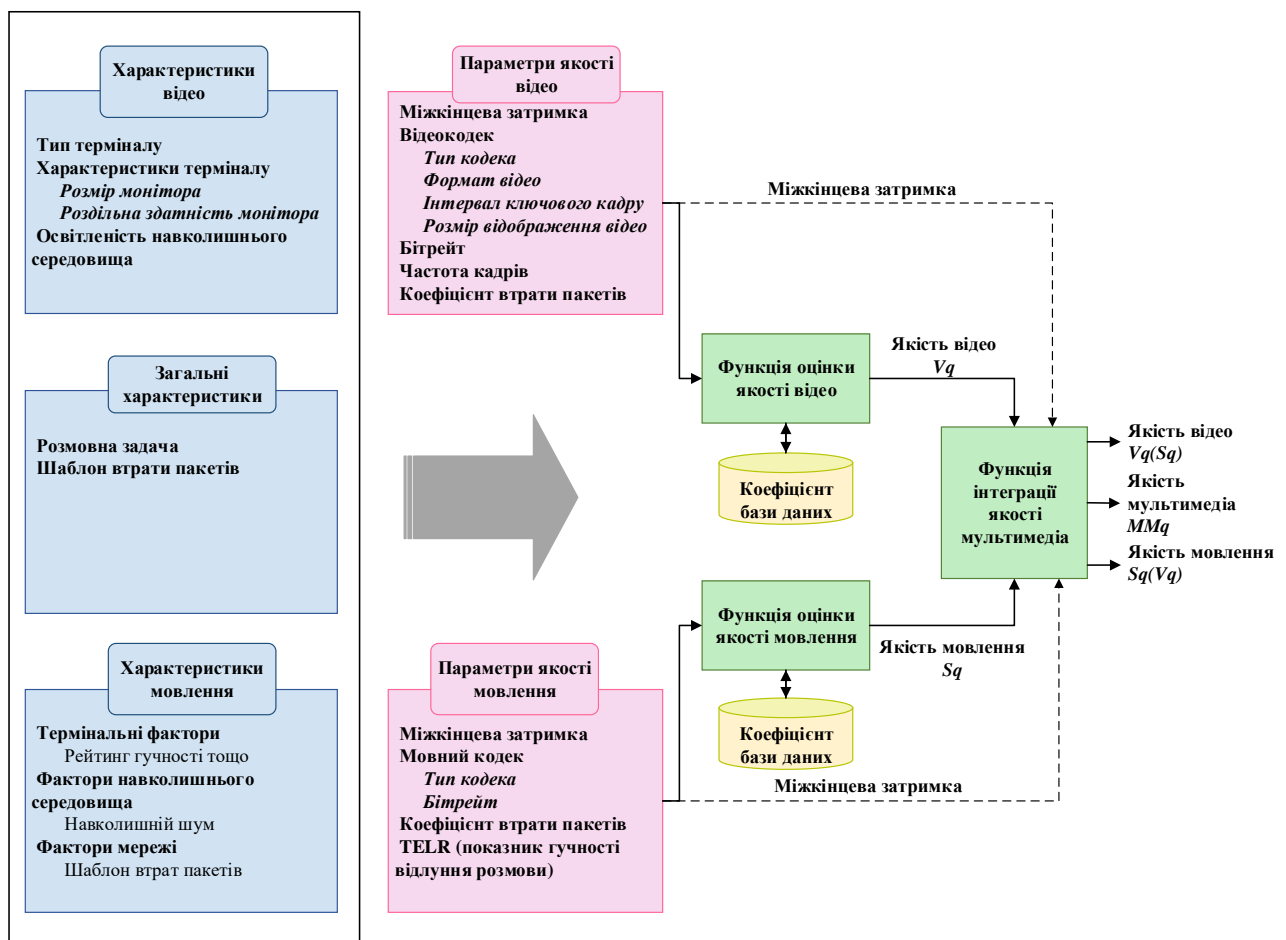


Рис. 4.15. Узагальнена модель оцінки якості мультимедійних сервісів [177]

Відповідно до змісту стандарту ITU-T G.1070 [177] найбільш адекватну оцінку QoE можна отримати за допомогою показників MOS (Mean Opinion Score). Загалом використання QoE-показників дозволяє більш повно врахувати особливості надання тієї чи іншої мультимедійної послуги з урахуванням множини найбільш різноманітних параметрів та характеристик технічних пристроїв, їхнього програмного забезпечення, а також мережного трафіка. Це стосується, насамперед, терміналів користувачів (смартфонів, планшетів, відеотерміналів, серверів, ноутбуків тощо), комутаційного обладнання мереж доступу та транспортних мереж (точок доступу, комутаторів, маршрутизаторів та шлюзів), а також властивостей та вимог безпосередньо мережних додатків [330–333].

Як показано на рис. 4.15, модель оцінки показників мультимедійної якості (MultiMedia Quality, *MMq*) має враховувати якість обслуговування окремо голосового потоку, а окремо відеопотоку пакетів з обов'язковою синхронізацією цих процесів як на рівні транспортної мережі, так і на рівні термінального користувача. У зв'язку з цим, значний вплив на показники мультимедійної якості здійснюють якраз процеси, що протікають у транспортних ТКМ. Саме на рівні транспортної ТКМ пакети зазнають найбільш суттєві затримки в передачі та втрати в разі перевантаження та відмов обладнання. Дієвим засобом покращення QoE або ж забезпечення заданого рівня якості обслуговування є саме протоколи маршрутизації та відмовостійкої маршрутизації. Тому в цьому підрозділі будуть запропоновані розв'язання задачі QoE-маршрутизації із забезпеченням мультимедійної якості, що базуються на реалізації принципів тензорного підходу до моделювання ТКМ.

#### **4.5.1. Опис потокової моделі маршрутизації мультимедійного трафіка в телекомунікаційній мережі**

Як базова пропонується математична модель, що представлена в пункті 2.5.2 та описує структуру ТКМ у вигляді одновимірної мережі  $S = (U, V)$ .

Зважаючи на те, що в подальшому дослідження будуть проводитися для маршрутизації мультимедійного трафіка, визначимося, що  $K$  – множина мультимедійних сесій у мережі. Тоді через  $k^{SP}$  позначимо аудіопотік, а через  $k^{video}$  – відеопотік  $k$ -ої мультимедійної сесії. Так, для розв’язання задачі маршрутизації аудіо- та відеопотоків  $k$ -ої мультимедійної сесії необхідно розрахувати множину маршрутних змінних  $x_{i,j}^{k^{SP}}$  та  $x_{i,j}^{k^{video}}$ , кожна з яких характеризує частку інтенсивності відповідно аудіо- та відеопотоків, що генеруються протягом  $k$ -ої мультимедійної сесії та протікають у каналі  $(i, j)$ .

Аналогічно до умови (2.64) у цій моделі на маршрутні змінні також накладаються обмеження вигляду:

$$0 \leq x_{i,j}^{k^{SP}} \leq 1 \quad \text{та} \quad 0 \leq x_{i,j}^{k^{video}} \leq 1. \quad (4.22)$$

Крім умов (4.22), на маршрутні змінні накладаються обмеження, представлені умовами збереження окремо аудіо- та відеопотоку на маршрутизаторах мережі з урахуванням можливих втрат пакетів, викликаних перевантаженням буфера черг. Так, наприклад, у межах запропонованої моделі маршрутизації, аналогічно до виразу (2.71), умова збереження аудіопотоку матиме такий вигляд [89]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{j:(i,j) \in V} x_{i,j}^{k^{SP}} = 1 \quad \text{якщо} \quad k^{SP} \in K, u_i = s_k; \\ \sum_{j:(i,j) \in V} x_{i,j}^{k^{SP}} - \sum_{j:(j,i) \in V} x_{j,i}^{k^{SP}} (1 - p_{j,i}) = 0 \quad \text{якщо} \quad k^{SP} \in K, u_i \neq s_k, d_k; \\ \sum_{j:(j,i) \in V} x_{i,j}^{k^{SP}} (1 - p_{i,j}) = b^{k^{SP}} \quad \text{якщо} \quad k^{SP} \in K, u_i = d_k, \end{array} \right. \quad (4.23)$$

де  $b^{k^{SP}}$  – частка інтенсивності аудіопотоку  $k^{SP}$ , що була успішно обслугована мережею, тобто пакети якого доставлені до маршрутизатора-отримувача.

Умови збереження для відеопотоку  $k^{video}$  мають аналогічний до (4.23) вигляд:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{j:(i,j) \in V} x_{i,j}^{k^{video}} = 1, \text{ якщо } k^{video} \in K, u_i = s_k; \\ \sum_{j:(i,j) \in V} x_{i,j}^{k^{video}} - \sum_{j:(j,i) \in V} x_{j,i}^{k^{video}} (1 - p_{j,i}) = 0, \text{ якщо } k^{video} \in K, u_i \neq s_k, d_k; \\ \sum_{j:(j,i) \in V} x_{i,j}^{k^{video}} (1 - p_{i,j}) = b^{k^{video}}, \text{ якщо } k^{video} \in K, u_i = d_k, \end{array} \right. \quad (4.24)$$

де  $b^{k^{video}}$  – частка інтенсивності аудіопотоку  $k^{video}$ , яка була успішно обслугована мережею.

Варто зазначити, що ймовірність втрат пакетів у межах цієї моделі, може розраховуватися за допомогою виразу (2.72), який доречний для прикладу, коли робота  $j$ -го інтерфейсу  $i$ -го маршрутизатора моделюється системою масового обслуговування з відмовами виду  $M/M/1/N$ .

Сумарна інтенсивність потоків  $\lambda_{i,j}$  різних мультимедійних сесій, які надходять до каналу  $(i,j)$ , розраховується за допомогою такого виразу:

$$\lambda_{i,j} = \sum_{k \in K} (\lambda_{k^{SP}}^{\langle \text{вим} \rangle} x_{i,j}^{k^{SP}} + \lambda_{k^{video}}^{\langle \text{вим} \rangle} x_{i,j}^{k^{video}}), \quad (4.25)$$

де  $\lambda_{k^{SP}}^{\langle \text{вим} \rangle}$  та  $\lambda_{k^{video}}^{\langle \text{вим} \rangle}$  – середні інтенсивності аудіо- та відеопотоків пакетів  $k$ -ої мультимедійної сесії відповідно.

Інтенсивність успішно переданих пакетів через  $j$ -й інтерфейс  $i$ -го маршрутизатора для кожного окремого аудіо-  $k^{sp}$  та відеопотоку  $k^{video}$   $k$ -ої мультимедійної сесії визначається виразами

$$\lambda_{i,j}^{k^{sp}} = \lambda_{k^{sp}}^{\langle \text{вум} \rangle} x_{i,j}^{k^{sp}} (1 - p_{i,j}) \quad \text{та} \quad \lambda_{i,j}^{k^{video}} = \lambda_{k^{video}}^{\langle \text{вум} \rangle} x_{i,j}^{k^{video}} (1 - p_{i,j}). \quad (4.26)$$

Тоді інтенсивності відкинутих пакетів аудіо- та відеопотоків  $k$ -ої мультимедійної сесії на  $j$ -му інтерфейсі  $i$ -го вузла розраховуються таким чином:

$$r_{i,j}^{k^{sp}} = \lambda_{k^{sp}}^{\langle \text{вум} \rangle} x_{i,j}^{k^{sp}} p_{i,j} \quad \text{та} \quad r_{i,j}^{k^{video}} = \lambda_{k^{video}}^{\langle \text{вум} \rangle} x_{i,j}^{k^{video}} p_{i,j}. \quad (4.27)$$

Для забезпечення керованості процесом боротьби з перевантаженням каналів і черг з урахуванням (4.25) до структури моделі вводяться такі обмеження [89]:

$$\lambda_{i,j} < \varphi_{i,j}. \quad (4.28)$$

#### 4.5.2. Методика розрахунку показника мультимедійної якості

Відповідно до рекомендації ІТУ-Т G.1070 [177], для розрахунку показника мультимедійної якості ( $MMq$ ) використовується вираз

$$MMq = m_1 MM_{SV} + m_2 MM_T + m_3 MM_{SV} MM_T + m_4, \quad (4.29)$$

у якому  $MM_{SV}$  – показник якості передачі аудіовізуальної інформації;

$MM_T$  – показник погіршення якості внаслідок наявності затримок і розсинхронізації процесів передачі пакетів аудіо- та відеопотоків;

$m_1, m_2, \dots, m_l$  – коефіцієнти, які залежать від параметрів дисплея термінального пристрою та цілей спілкування [177]. Загалом показник мультимедійної якості може приймати такі значення (табл. 4.1) [177]:

$$1 \leq MM_q \leq 5. \quad (4.30)$$

Показник якості передачі аудіовізуальної інформації  $MM_{SV}$  визначається за допомогою таких виразів [177]:

$$MM_{SV} = m_5 S_q + m_6 V_q + m_7 S_q V_q + m_8 \text{ за умови } 1 \leq MM_{SV} \leq 5, \quad (4.31)$$

$$MM_T = \max\{AD + MS, 1\}, \text{ якщо } 1 \leq MM_T \leq 5, \quad (4.32)$$

$$AD = m_9 (T_S + T_V) + m_{10}, \quad (4.33)$$

$$MS = \begin{cases} \min[m_{11}(T_S - T_V) + m_{12}, 0], & \text{якщо } T_S \geq T_V, \\ \min[m_{13}(T_V - T_S) + m_{14}, 0], & \text{якщо } T_S < T_V, \end{cases} \quad (4.34)$$

де  $MS$  – коефіцієнт, що враховує розсинхронізацію між звуком і зображенням;

$AD$  – параметр, який відображає вплив середніх затримок пакетів аудіо- ( $T_S$ ) та відеопотоків ( $T_V$ ) (параметри  $T_S$  та  $T_V$  задаються в мілісекундах);

$S_q$  и  $V_q$  – показники якості передачі звуку та зображення відповідно.

Показники якості передачі аудіо (мовлення)  $S_q$  і зображення  $V_q$  за відсутності відлуння сигналу є функціями величин середніх затримок  $T_S$ ,  $T_V$  та відсотка втрачених аудіо- та відеопотоків пакетів  $P_S$  і  $P_V$  відповідно, тобто

$S_q(T_S, P_S)$  та  $V_q(T_V, P_V)$ . Так, визначення показника якості передачі аудіо (мовлення)  $S_q$  відбувається за допомогою індексу якості передачі звуку, що, наприклад, для вузькосмугового аудіопотоку оцінюється за такою формулою [177]:

$$Q = 93,193 - I_{dte}(T_S) - I_{e-eff}(P_S), \text{ якщо } Q \leq 100, \quad (4.35)$$

де  $I_{dte}(T_S)$  є показником деградації якості передачі звуку, спричиненої відлунням мовлення, і визначається як

$$I_{dte}(T_S) = \left[ \frac{94,769 - Re}{2} + \sqrt{\frac{(94,769 - Re)^2}{4} + 100} - 1 \right] (1 - e^{-T_S}), \quad (4.36)$$

за умови

$$Re = 80 + 2,5(TErv-14), \quad (4.37)$$

$$TErv = TERL - 40 \lg \frac{1 + \frac{T_S}{10}}{1 + \frac{T_S}{150}} + 6e^{-0,3T_S^2}, \quad (4.37)$$

де  $TERL$  – показник гучності відлуння розмови.

Коефіцієнт зниження якості  $I_{e-eff}(P_S)$ , викликаного кодуванням та втратами мовних пакетів, аналогічно до виразу (4.6) розраховується таким чином:

$$I_{e-eff}(P_S) = I_{e_s} + (95 - I_{e_s}) \frac{P_S}{P_S + B_{pl_s}}. \quad (4.38)$$

Варто зазначити, що індекс якості  $Q$  еквівалентний R-фактору (4.3) [176], але для розрахунку якості передачі аудіо (мовлення)  $S_q$  вираз, що відповідає за індекс якості  $Q$ , було спрощено через меншу кількість вхідних параметрів. Отже, якість звуку  $S_q$  визначається як функція показника якості  $Q$ :

$$S_q = \begin{cases} 1, & \text{якщо } Q < 0, \\ 1 + 0,035Q + 7 \cdot 10^{-6} \cdot Q(Q - 60)(100 - Q), & \text{якщо } 0 < Q < 100, \\ 4,5, & \text{якщо } Q > 100. \end{cases} \quad (4.39)$$

Нагадаємо, що вирази (4.35)–(4.39) використовуються для розрахунку показника якості мовлення  $S_q$  вузькосмугового сигналу. Оцінка якості звуку  $S_q$  для широкосмугового мовлення представлено в стандарті ITU-T G.1070 [177].

Крім оцінки якості аудіо (мовлення) необхідно також визначити якість передачі відеозображення. Так, відповідно до [177] параметр якості передачі зображення  $V_q$  розраховується таким чином:

$$V_q = 1 + I_{coding} \exp\left(-\frac{R_V}{D_{R_V}}\right), \quad (4.40)$$

де  $I_{coding}$  – коефіцієнт зниження якості відео, що обумовлене використанням кодеків;

$D_{R_V}$  – фактор стійкості кодека в разі втрати пакетів.

Коефіцієнт зниження якості відео  $I_{coding}$ , що обумовлений використанням кодеків, розраховується як

$$I_{coding} = I_{O_{fr}} \exp\left\{-\frac{(\ln(F_{R_V}) - \ln(O_{fr}))^2}{2D_{R_V}^2}\right\}, \quad (4.41)$$



де  $Fr_V$  – частота кадрів;

$D_{Fr_V}$  – ступінь стійкості якості відеозапису до частоти кадрів  $Fr_V$ ;

$O_{fr}$  – оптимальна частота кадрів, що максимізує якість відео для кожної бітової відеошвидкості  $Br_V$ , яка розраховується за допомогою такого виразу:

$$O_{fr} = v_1 + v_2 Br_V, 1 \leq O_{fr} \leq 30. \quad (4.42)$$

Коли  $Fr_V = O_{fr}$ ,  $I_{coding} = I_{O_{fr}}$ , де  $O_{fr}$  – максимальна якість відео для кожної бітової відеошвидкості  $Br_V$ , що розраховується як:

$$I_{O_{fr}} = v_3 - \frac{v_3}{1 + \left(\frac{Br_V}{v_4}\right)^{v_5}}, 0 \leq I_{O_{fr}} \leq 4. \quad (4.43)$$

Ступінь стійкості якості відеозапису  $D_{Fr_V}$  також розраховується як

$$D_{Fr_V} = v_6 + v_7 Br_V, 0 \leq D_{Fr_V}. \quad (4.44)$$

Фактор стійкості кодека в разі втрати пакетів  $D_{R_V}$  визначається як

$$D_{R_V} = v_{10} + v_{11} \exp\left(-\frac{Fr_V}{v_8}\right) + v_{12} \exp\left(-\frac{Br_V}{v_9}\right), 0 < D_{R_V}. \quad (4.45)$$

Зазначені в (4.42)–(4.35) коефіцієнти  $v_1, v_2, \dots, v_{12}$  є константами та залежать від типу кодека, формату відео, інтервалу ключового кадру та розміру відеозображення, які наведені в рекомендації [177], та під час дослідження застосовувалися як вихідні дані.

### 4.5.3. Умови захисту показника мультимедійної якості під час реалізації стратегії QoE-маршрутизації

У загальному випадку умова захисту показника мультимедійної якості для  $k$ -ї мультимедійної сесії має такий вигляд:

$$MM_q^k \geq MM_{q<вим>}^k, \quad (4.46)$$

де  $MM_q^k$  та  $MM_{q<вим>}^k$  – розраховане значення та вимоги, що висуваються до рівня мультимедійної якості для обслуговування  $k$ -го мультимедійного потоку.

Аналіз моделі (4.29)–(4.45) вказує на те, що основною проблемою в розрахунку  $MM_q$  є визначення аналітичних виразів для знаходження величин міжкінцевих затримок  $T_S$  та  $T_V$ , а також відсотка втрачених пакетів  $P_S$  і  $P_V$  для аудіо- й відеопотоків відповідно, що також залежать від шуканих маршрутних змінних  $x_{i,j}^{k,sp}$  та  $x_{i,j}^{k,video}$  (рис. 4.16).

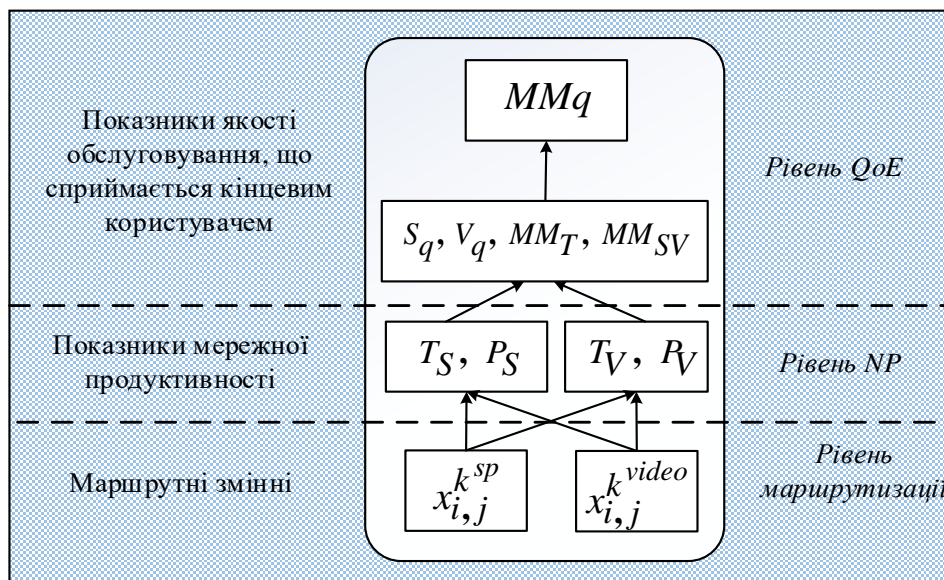


Рис. 4.16. Функціональна ієрархія залежності показників QoE, NP та маршрутних змінних у процесі маршрутизації мультимедійного трафіка в ТКМ

Завдання полягає в тому, щоб у ході QoE-маршрутизації мультимедійного трафіка для кожної пари аудіо- та відеопотоків пакетів, сформованих у межах відповідної мультимедійної сесії, підтримувалася можливість аналітичного розрахунку показника  $MMq$  з метою виконання умов (4.46). Ґрунтуючись на підході, який розглянуто в попередніх підрозділах цього розділу, для визначення міжкінцевих затримок  $T_S$  і  $T_V$ , а також відсотка втрачених пакетів  $P_S$  та  $P_V$  буде використано тензорні моделі ТКМ. До того ж, залежно від типу використаних базисів представлення тензорів основних функціональних параметрів мережі, моделі розрахунку зазначених показників мережної продуктивності для аудіо- та відеопотоків будуть дещо відрізнятися.

З використанням тензорної моделі ТКМ, представленої в базисі контурів та вузлових пар (2.33)–(2.39), середню міжкінцеву затримку (мс) пакетів  $k^{sp}$ -потoku, відповідно до (2.38), з урахуванням (2.39) можна визначити за допомогою такого виразу:

$$T_S^k = \frac{\lambda_{k^{sp}}^{\langle eum \rangle} b^{k^{sp}} - G_{\pi\eta}^{\langle 4,2 \rangle} \left[ G_{\pi\eta}^{\langle 4,4 \rangle} \right]^{-1} \Lambda_{\eta-1}^{k^{sp}}}{G_{\pi\eta}^{\langle 4,1 \rangle} - G_{\pi\eta}^{\langle 4,2 \rangle} \left[ G_{\pi\eta}^{\langle 4,4 \rangle} \right]^{-1} G_{\pi\eta}^{\langle 4,3 \rangle}} \cdot 1000, \quad (4.47)$$

де  $\Lambda_{\eta-1}^{k^{sp}}$  – вектор інтенсивностей втрачених пакетів  $k^{sp}$ -потoku на інтерфейсах маршрутизаторів, координати яких визначаються виразом

$$\lambda_{\eta}^i = \sum_{j=1}^m \lambda_{k^{sp}}^{\langle eum \rangle} x_{i,j}^{k^{sp}} P_{i,j}. \quad (4.48)$$

У цьому випадку середня міжкінцева затримка (мс) пакетів  $k^{video}$ -потoku визначатиметься аналогічним шляхом та буде розраховуватись як

$$T_V^k = \frac{\lambda_{k^{video}}^{\langle \text{вум} \rangle} b^{k^{video}} - G_{\pi\eta}^{\langle 4,2 \rangle} \left[ G_{\pi\eta}^{\langle 4,4 \rangle} \right]^{-1} \Lambda_{\eta-1}^{k^{video}}}{G_{\pi\eta}^{\langle 4,1 \rangle} - G_{\pi\eta}^{\langle 4,2 \rangle} \left[ G_{\pi\eta}^{\langle 4,4 \rangle} \right]^{-1} G_{\pi\eta}^{\langle 4,3 \rangle}} \cdot 1000, \quad (4.49)$$

де  $\Lambda_{\eta-1}^{k^{video}}$  – вектор інтенсивностей втрачених пакетів  $k^{video}$ -потоків на інтерфейсах маршрутизаторів, координати яких визначаються аналогічно виразу (4.48):

$$\lambda_{\eta}^i = \sum_{j=1}^m \lambda_{k^{video}}^{\langle \text{вум} \rangle} x_{i,j}^{k^{video}} P_{i,j}. \quad (4.50)$$

Вирази для розрахунку відсотка втрачених пакетів для кожного аудіо- та відеопотоків для  $k$ -ї мультимедійної сесії окремо, тобто величини  $P_S^k$  та  $P_V^k$ , мають такий вигляд:

$$P_S^k = (1 - b^{k^{sp}}) \cdot 100\%, \quad (4.51)$$

$$P_V^k = (1 - b^{k^{video}}) \cdot 100\%. \quad (4.52)$$

У процесі використання тензорної моделі ТКМ, представленої в системі координат міжполюсних шляхів та внутрішніх вузлових пар (2.1)–(2.32), (2.41)–(2.50), ґрунтуючись на виразах (2.51) та (2.52), можна розрахувати середні міжкінцеві затримки пакетів (мс) аудіо- та відеопотоків  $k$ -ї мультимедійної сесії за допомогою таких виразів:

$$T_S^k = \frac{1000}{\lambda_{k^{sp}}^{\langle \text{вум} \rangle} b^{k^{sp}}} \left( \Lambda_{\gamma}^t E_{\gamma\epsilon}^{\langle 1 \rangle} \Lambda_{\gamma} + \Lambda_{\gamma}^t E_{\gamma\epsilon}^{\langle 2 \rangle} \Lambda_{\epsilon} \right), \quad (4.53)$$

$$T_V^k = \frac{1000}{\lambda_{k^{video}}^{(sum)} b^{k^{sp} video}} \left( \Lambda_{\gamma}^t E_{\gamma\epsilon}^{(1)} \Lambda_{\gamma} + \Lambda_{\gamma}^t E_{\gamma\epsilon}^{(2)} \Lambda_{\epsilon} \right). \quad (4.54)$$

Модель розрахунку відсотка втрачених пакетів для кожного аудіо- та відеопотоків для  $k$ -ї мультимедійної сесії окремо, тобто величин  $P_S^k$  (4.51) та  $P_V^k$  (4.52), залишається незмінною.

#### 4.5.4. Формалізація критеріїв оптимальності рішень задачі QoE-маршрутизації для забезпечення мультимедійної якості

Розв'язання задачі QoE-маршрутизації в процесі забезпечення мультимедійної якості може бути реалізоване як розв'язання оптимізаційної задачі з визначенням множини маршрутних змінних  $x_{i,j}^{k^{sp}}$  та  $x_{i,j}^{k^{video}}$ . На маршрутні змінні накладаються обмеження, представлені умовами (4.22)–(4.24), (4.28) і (4.46). Критерієм оптимальності маршрутних рішень у цьому випадку може бути умова, пов'язана з максимізацією загальної продуктивності телекомунікаційної мережі [89]:

$$\max_{x^{sp}, x^{video}, b^{sp}, b^{video}} \sum_{k \in K} \left( \lambda_{k^{sp}}^{(sum)} b^{k^{sp}} + \lambda_{k^{video}}^{(sum)} b^{k^{video}} \right). \quad (4.55)$$

Для забезпечення оптимального використання мережного ресурсу може застосовуватися критерій, оснований на маршрутних метриках та пов'язаний із мінімізацією такої цільової функції:

$$J = \sum_{k^{sp}, k^{video}} \sum_{\substack{\in K \\ w_{i,j} \in W}} h_{i,j}^x \left( \lambda_{k^{sp}}^{(sum)} x_{i,j}^{k^{sp}} + \lambda_{k^{video}}^{(sum)} x_{i,j}^{k^{video}} \right). \quad (4.56)$$

У випадках, коли весь доступний мережний ресурс доцільно максимально задіяти на підвищення якості обслуговування на рівні кінцевого користувача, доцільно використати критерій вигляду

$$\sum_{k \in K} f(pr^k) MM_q^k \rightarrow \max, \quad (4.57)$$

у якому  $f(pr^k)$  – вагова лінійно або нелінійно зростаюча функція від значень ІР-пріоритету або класу  $k$ -ї мультимедійної сесії.

#### **4.6. Дослідження запропонованих моделей QoE-маршрутизації із забезпеченням мультимедійної якості**

##### **4.6.1. Дослідження тензорної моделі QoE-маршрутизації із забезпеченням мультимедійної якості, представленої в базисі контурів та вузлових пар**

Для оцінки адекватності та ефективності розробленої тензорної моделі QoE-маршрутизації із забезпеченням мультимедійної якості, представленої в базисі контурів та вузлових пар (4.22)–(4.24), (4.28), (4.46)–(4.52), (4.57), проведено дослідження на фрагменті телекомунікаційної мережі, структура якої наведена на рис. 4.17. Досліджувана мережа складалася з 16 маршрутизаторів і 24 каналів зв'язку, у розривах яких на рис. 4.17 указані пропускні здатності (1/с). Робота кожного з інтерфейсів мережних маршрутизаторів, наприклад, моделювалася системою масового обслуговування M/M/1/N, а ємність буфера становила 30 пакетів ( $N = 30$ ).

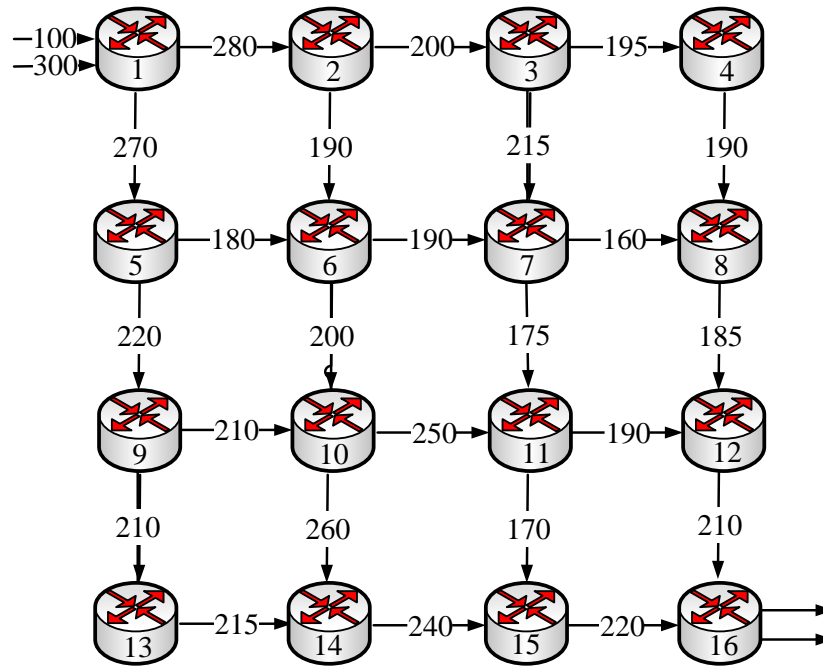


Рис. 4.17. Структура досліджуваної телекомунікаційної мережі

Розглядався варіант організації однієї мультимедійної сесії, коли пакети аудіо- та відеопотоків передавалися між першим та шістнадцятим маршрутизаторами з такими вимогами:

$$\lambda_{k^{sp}}^{\langle vim \rangle} = 100 \text{ 1/c}; \quad \lambda_{k^{video}}^{\langle vim \rangle} = 300 \text{ 1/c}; \quad MMq_{\langle vim \rangle} = 3,5. \quad (4.58)$$

QoE-вимоги в (4.58) відповідали випадку (табл. 4.1), коли деякі користувачі будуть незадоволені [176].

Після розрахунку маршрутних змінних  $x_{i,j}^{k^{sp}}$  та  $x_{i,j}^{k^{video}}$  було визначено порядок розподілу аудіо- та відеопотоків каналами зв'язку телекомунікаційної мережі з урахуванням втрат пакетів  $p_{i,j}$  на відповідних інтерфейсах маршрутизаторів. Порядок маршрутизації цих потоків зображений на рис. 4.18.

У розривах каналів зв'язку (зверху донизу) вказані інтенсивність аудіопотоку, інтенсивність відеопотоку та пропускна здатність каналу зв'язку. Крім того, окремими стрілками, які виходять з вузлів R1, R12 та R15, показані

дробом інтенсивності втрат аудіопотоку (чисельник) і відеопотоку (знаменник) на відповідних інтерфейсах цих маршрутизаторів.

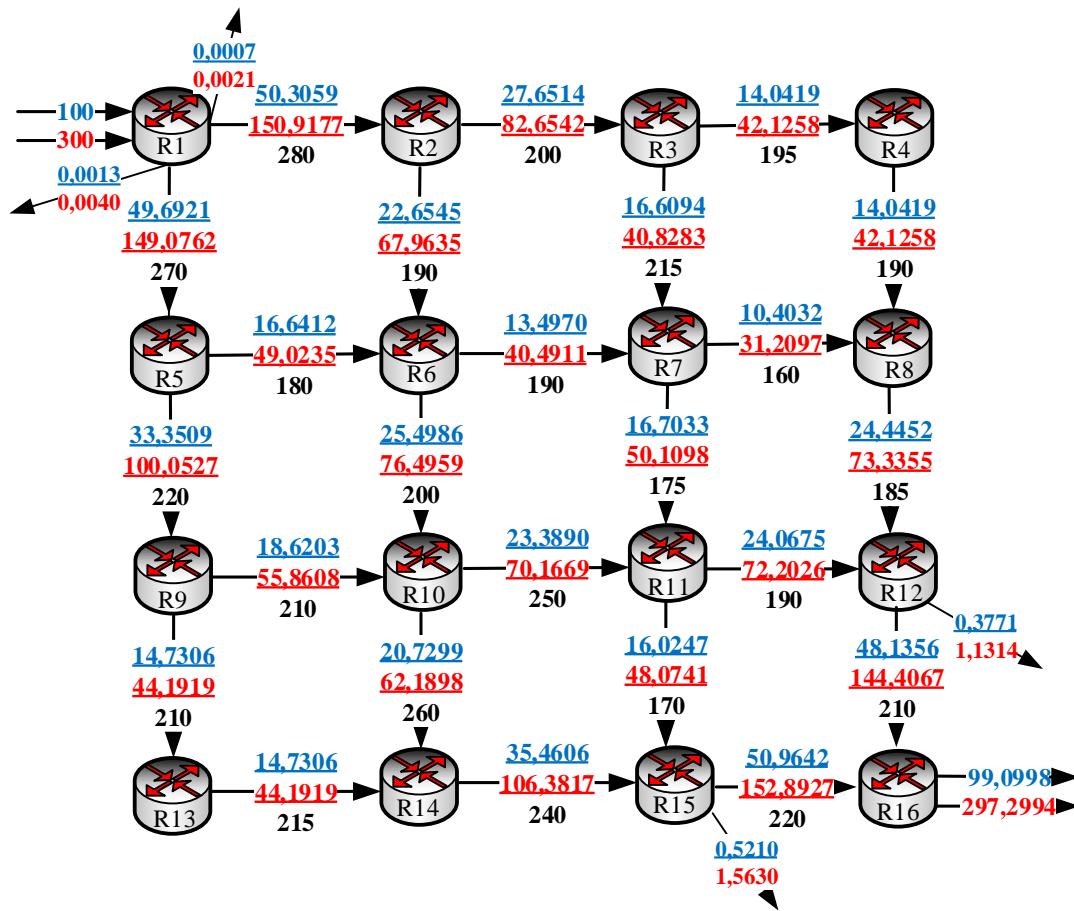


Рис. 4.18. Порядок QoS-маршрутизації аудіо- та відеопотоків у ТКМ

Унаслідок розрахунків, представлених у табл. 4.7, встановлено, що особливістю використання зазначеної тензорної моделі ТКМ у ході розв'язання задачі QoS-маршрутизації є рівність між собою відповідних показників мережної продуктивності для аудіо- та відеопотоків, тобто  $T_S = T_V = 97,6$  мс;  $P_S = P_V = 0,9\%$ . Це сприяло максимальній синхронізації процесів передачі пакетів аудіо- та відеопотоків та, як наслідок, привело до таких значень QoS-показників:

$$MM_{SV} = 3,3634, \quad MM_T = 3,9149, \quad MM_q = 3,5455,$$

що кількісно задовольняло умову (4.46) у разі вимог (4.58).



Таблиця 4.7

**Результати розв'язання задачі QoE-маршрутизації із забезпеченням  
мультимедійної якості**

Канал зв'язку	$\varphi_{i,j}$ , 1/с	QoE-вимоги: $\lambda_{k^{sp}}^{\langle \text{вим} \rangle} = 100$ 1/с, $\lambda_{k^{video}}^{\langle \text{вим} \rangle} = 300$ 1/с, $MMq \geq 3,5$				$\tau_{i,j}$ , мс
		Результати розрахунку аудіопотоку		Результати розрахунку відеопотоку		
		$\lambda_{i,j}^{k^{sp}}$ , 1/с	$r_{i,j}^{k^{sp}}$ , 1/с	$\lambda_{i,j}^{k^{video}}$ , 1/с	$r_{i,j}^{k^{video}}$ , 1/с	
(1,2)	280	50,3059	0,0007	150,9177	0,0021	12,7
(1,5)	270	49,6921	0,0013	149,0762	0,0040	14,0
(2,3)	200	27,6514	0	82,6542	0	11,2
(2,6)	190	22,6545	0	67,9645	0	10,1
(3,4)	195	14,0419	0	42,1258	0	7,2
(3,7)	215	16,6094	0	40,8283	0	6,2
(4,8)	190	14,0419	0	42,1258	0	7,5
(5,6)	180	16,6412	0	49,0235	0	8,7
(5,9)	220	33,3509	0	100,0527	0	11,5
(6,7)	190	13,4970	0	40,4911	0	7,4
(6,10)	200	25,4986	0	76,4959	0	10,2
(7,8)	160	10,4032	0	31,2097	0	8,4
(7,11)	175	16,7033	0	50,1098	0	9,2
(8,12)	185	24,4452	0	73,3355	0	11,5
(9,10)	210	18,6203	0	55,8608	0	7,4
(9,13)	210	14,7306	0	44,1919	0	6,6
(10,11)	250	23,3890	0	70,1669	0	6,4
(10,14)	260	20,7299	0	62,1898	0	5,6
(11,12)	190	24,0675	0	72,2026	0	10,7
(11,15)	170	16,0247	0	48,0741	0	9,4
(12,16)	210	48,1356	0,3771	144,4067	1,1314	47,6
(13,14)	215	14,7306	0	44,1919	0	6,4
(14,15)	240	35,4606	0	106,3817	0	10,2
(15,16)	220	50,9642	0,5210	152,8927	1,5630	48,8

Для прикладу, використання відомої потокової моделі маршрутизації (2.64)–(2.66), (2.75), основаної на маршрутних метриках пропускної здатності (як у протоколах EIGRP та OSPF [69]), забезпечило мультимедійну якість на рівні  $MMq = 2,76$ . Застосування раніше відомої моделі маршрутизації Traffic Engineering (2.64)–(2.67), (2.76), (2.77) [71] забезпечило мультимедійну якість на рівні  $MMq = 3,05$ . Тобто використання запропонованої моделі QoE-маршрутизації дозволило покращити рівень мультимедійної якості на 28,46 % порівняно з моделлю, основаною на маршрутних метриках, та на 16,24 % порівняно з TE-рішенням. Варто зазначити, що відомі маршрутні рішення не забезпечували виконання QoE-вимог (4.58) за умови  $MMq_{<вим>} = 3,5$ .

#### **4.6.2. Дослідження тензорної моделі QoE-маршрутизації із забезпеченням мультимедійної якості, представленої в базисі міжполюсних шляхів та внутрішніх вузлових пар**

Для перевірки адекватності та підтвердження ефективності розробленої тензорної моделі QoE-маршрутизації із забезпеченням мультимедійної якості, представленої в базисі міжполюсних шляхів та внутрішніх вузлових пар (4.22)–(4.24), (4.28), (4.46), (4.51)–(4.54), (4.57), було проведено дослідження на фрагменті телекомунікаційної мережі, структура якої наведена на рис. 2.20. ТКМ містила 12 маршрутизаторів та 17 каналів зв'язку, у розривах яких показано їхні пропускні здатності (1/с). Джерелом пакетів був перший маршрутизатор, а отримувачем – дванадцятий маршрутизатор. Робота кожного з інтерфейсів маршрутизаторів моделювалася СМО М/М/1/Н, коли  $N=50$ .

Розглядався варіант організації однієї мультимедійної сесії з такими вимогами:

$$\lambda_{k^{SP}}^{\langle vim \rangle} = 340 \text{ 1/с}, \lambda_{k^{video}}^{\langle vim \rangle} = 650 \text{ 1/с}; MMq_{<вим>} = 3,3. \quad (4.59)$$

Тоді на рис. 4.19 показано результат розв'язання задачі QoE-маршрутизації із забезпеченням мультимедійної якості, який отриманий з використанням тензорної моделі, представленої в базисі міжполюсних шляхів та внутрішніх вузлових пар. На рис. 4.19 у розривах каналів зв'язку дробом вказані такі дані (згори донизу): інтенсивність аудіопотоку (1/с), інтенсивність відеопотоку (1/с), середня затримка пакетів у цьому каналі зв'язку (мс). На тих інтерфейсах маршрутизаторів, де спостерігалися втрати пакетів, у розривах стрілок зазначені інтенсивності втрат аудіопотоку (чисельник) та відеопотоку (знаменник).

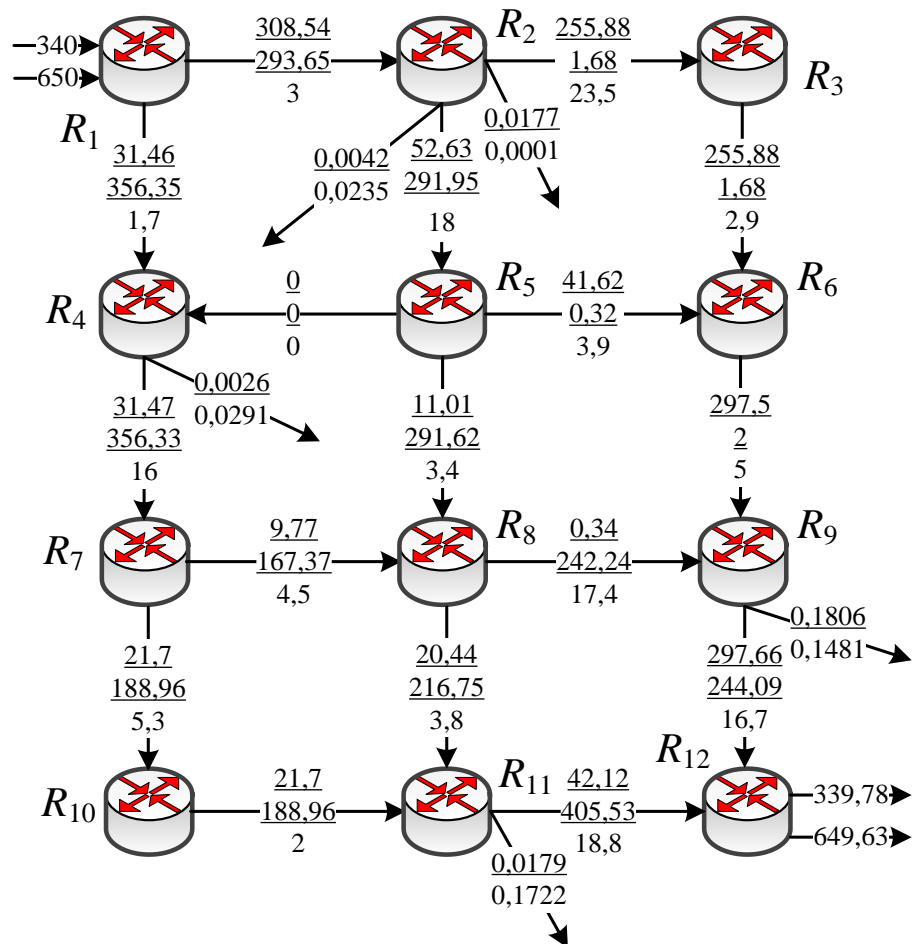


Рис. 4.19. Порядок QoE-маршрутизації аудіо- та відеопотоків у ТКМ

Характеристики розрахованих шляхів для аудіо- та відеопотоків у ТКМ зазначені в табл. 4.8.

Таблиця 4.8

**Характеристика шляхів, отриманих у процесі розв'язання задачі  
QoE-маршрутизації мультимедійного трафіка в ТКМ**

$\lambda^*$ (1/с)	$ P $	Характеристики розрахованих шляхів		
		Маршрут	$\lambda_p$ (1/с)	$\tau_p$ (мс)
Для аудіопотоку $\lambda_{k^{sp}}^{(aum)} = 340$ 1/с; $T_S = 49,759$ мс; $P_S = 0,0656$				
339,78	6	$R_1 \rightarrow R_2 \rightarrow R_3 \rightarrow R_6 \rightarrow R_9 \rightarrow R_{12}$	255,73	51,1
		$R_1 \rightarrow R_2 \rightarrow R_5 \rightarrow R_6 \rightarrow R_9 \rightarrow R_{12}$	41,59	46,5
		$R_1 \rightarrow R_2 \rightarrow R_5 \rightarrow R_8 \rightarrow R_9 \rightarrow R_{12}$	0,34	58,4
		$R_1 \rightarrow R_2 \rightarrow R_5 \rightarrow R_8 \rightarrow R_{11} \rightarrow R_{12}$	10,66	46,9
		$R_1 \rightarrow R_4 \rightarrow R_7 \rightarrow R_{10} \rightarrow R_{11} \rightarrow R_{12}$	21,69	43,8
		$R_1 \rightarrow R_4 \rightarrow R_7 \rightarrow R_8 \rightarrow R_{11} \rightarrow R_{12}$	9,75	44,8
Для відеопотоку $\lambda_{k^{video}}^{(aum)} = 650$ 1/с; $T_V = 49,756$ мс; $P_V = 0,0575$				
649,63	6	$R_1 \rightarrow R_2 \rightarrow R_3 \rightarrow R_6 \rightarrow R_9 \rightarrow R_{12}$	1,68	51,1
		$R_1 \rightarrow R_2 \rightarrow R_5 \rightarrow R_6 \rightarrow R_9 \rightarrow R_{12}$	0,32	46,5
		$R_1 \rightarrow R_2 \rightarrow R_5 \rightarrow R_8 \rightarrow R_9 \rightarrow R_{12}$	242,1	58,4
		$R_1 \rightarrow R_2 \rightarrow R_5 \rightarrow R_8 \rightarrow R_{11} \rightarrow R_{12}$	49,36	46,9
		$R_1 \rightarrow R_4 \rightarrow R_7 \rightarrow R_{10} \rightarrow R_{11} \rightarrow R_{12}$	188,88	43,8
		$R_1 \rightarrow R_4 \rightarrow R_7 \rightarrow R_8 \rightarrow R_{11} \rightarrow R_{12}$	167,29	44,8

Основні QoE-показники, обчислені за результатами розв'язання задачі маршрутизації мультимедійного трафіка (табл. 4.8), наведено в табл. 4.9.

Таблиця 4.9

**Основні QoE-показники, обчислені за результатами розв'язання задачі  
маршрутизації мультимедійного трафіка з використанням запропонованої  
тензорної моделі**

Q	$Sq$	$Vq$	$MM_{SV}$	$MM_T$	$MM_q$
90,7478	4,3569	4,2489	3,2992	3,8828	3,451

За результатами розв'язання задачі QoE-маршрутизації із забезпеченням мультимедійної якості (рис. 4.19, табл. 4.8 та 4.9) можна зробити висновки.

1. Вдалося забезпечити необхідний рівень мультимедійної якості, оскільки виконувалась умова (4.58):  $MM_q = 3,451$ , коли  $MM_{q<вим>} = 3,3$ .

2. У ході QoE-маршрутизації середні міжкінцеві затримки пакетів аудіо- та відеопотоків становили  $T_S = 49,759$ мс і  $T_V = 49,756$ мс, тобто вони були максимально близькими для забезпечення синхронної доставки мультимедійного контенту кінцевому користувачеві, але все ж відрізнялись один від одного. Це різнило отримане рішення з рішенням, яке притаманне для тензорної моделі ТКМ, представленій в базисі контурів та вузлових пар (рис. 4.18). Для останньої була характерна рівність середніх затримок пакетів уздовж усіх доступних маршрутів. Крім того, під час використання тензорної моделі ТКМ, представленій в базисі міжполюсних шляхів та внутрішніх вузлових пар, застосовувалися не всі сім доступних шляхів, а лише шість, середні затримки вздовж яких (табл. 4.8) також відрізнялися між собою.

У процесі дослідження результати розв'язання задачі QoE-маршрутизації, які отримані за допомогою запропонованої тензорної моделі (4.22)–(4.24), (4.28), (4.46), (4.51)–(4.54), (4.57), порівнювалися за величиною  $MM_q$  з такими моделями:

- EIGRP модель: модель маршрутизації (2.64)–(2.66), (2.75), яка використовує метрику протоколу EIGRP;

- TE модель: модель маршрутизації (2.64)–(2.67), (2.76), (2.77), побудована відповідно до принципів технології Traffic Engineering (TE).

У табл. 4.10 показано порядок маршрутизації мультимедійного трафіка, який отримано для структури ТКМ, представленій на рис. 2.20, з використанням потокової моделі з метрикою протоколу EIGRP. У табл. 4.11 наведено показники QoE, що відповідають отриманому маршрутному рішенню (табл. 4.10).

Таблиця 4.10

**Порядок маршрутизації мультимедійного трафіка, який отримано за допомогою потокової моделі з метрикою протоколу EIGRP**

Канал зв'язку	$\tau_{i,j}$ , мс	Параметри мультимедійного трафіка:			
		$\lambda_{k^{SP}}^{\langle \text{вим} \rangle} = 340 \text{ 1/с}, \lambda_{k^{\text{video}}}^{\langle \text{вим} \rangle} = 650 \text{ 1/с}, T_S = 70,6304 \text{ мс};$ $P_S = 0,4550, T_V = 70,6295 \text{ мс}; P_V = 1,0047$			
		Порядок маршрутизації аудіопотоку		Порядок маршрутизації відеопотоку	
		$\lambda_{i,j}^{k^{SP}}, 1/с$	$r_{i,j}^{k^{SP}}, 1/с$	$\lambda_{i,j}^{k^{\text{video}}}, 1/с$	$r_{i,j}^{k^{\text{video}}}, 1/с$
(1,2)	3,745	340	0	333,01	0
(2,3)	3,92	265,55	0,34	10,23	0,013
(1,4)	1,51	0	0	316,99	0
(2,5)	5,87	72,92	1,19	317,6	5,17
(3,6)	3,08	265,55	0	10,23	0
(5,4)	2,68	0	0	27,39	0
(5,6)	5,69	0	0	124,3	0
(4,7)	9,47	0	0	344,38	0,0001
(5,8)	2,77	72,92	0	165,91	0
(6,9)	10,01	265,55	0	134,53	0,0004
(7,8)	3,28	0	0	94,93	0
(8,9)	5,35	72,92	0	40,25	0
(7,10)	6,64	0	0	249,45	0
(8,11)	3,58	0	0	220,6	0
(9,12)	11,49	338,45	0,02	174,77	0,01
(10,11)	2,22	0	0	249,45	0
(11,12)	28,53	0	0	468,70	1,34

Таблиця 4.11

**Основні QoE-показники, обчислені за результатами розв’язання задачі маршрутизації мультимедійного трафіка з використанням потокової моделі з метрикою протоколу EIGRP**

Q	$Sq$	$Vq$	$MM_{SV}$	$MM_T$	$MMq$
82,6794	4,1211	3,4171	2,4389	3,8693	2,4799

Аналогічно в табл. 4.12 наведено порядок маршрутизації мультимедійного трафіка, який отримано для тієї самої структури ТКМ (рис. 2.20), але з використанням потокової моделі Traffic Engineering. Відповідно в табл. 4.13 вказано показники QoE, які відповідають отриманому маршрутному рішенню (табл. 4.12).

За результатами аналізу змісту табл. 4.11 та 4.13 можна зробити висновок, що використання запропонованої тензорної моделі QoE-маршрутизації (4.22)–(4.24), (4.28), (4.46), (4.51)–(4.54), (4.57) порівняно з потоковою моделлю з метрикою протоколу EIGRP дозволило підвищити показник мультимедійної якості ( $MMq$ ) на 25,5 %, а порівняно з потоковою моделлю Traffic Engineering – на 15,2 %. Ці результати загалом підтверджували висновки щодо ефективності запропонованих рішень, отриманих у пункті 4.7.1. Варто зазначити, що відомі маршрутні рішення не забезпечували виконання QoE-вимог (4.58), коли  $MM_{q<вим>} = 3,3$ .

**Порядок маршрутизації мультимедійного трафіка, який отримано за допомогою потокової моделі Traffic Engineering**

Канал зв'язку	$\tau_{i,j}$ , мс	Параметри мультимедійного трафіка			
		$\lambda_{k^{sp}}^{\langle eum \rangle} = 340$ 1/с, $\lambda_{k^{video}}^{\langle eum \rangle} = 650$ 1/с, $T_S = 47,8116$ мс; $P_S = 0,1915$ , $T_V = 61,6230$ мс; $P_V = 0,4641$			
		Порядок маршрутизації аудіопотоку		Порядок маршрутизації відеопотоку	
		$\lambda_{i,j}^{k^{sp}}$ , 1/с	$r_{i,j}^{k^{sp}}$ , 1/с	$\lambda_{i,j}^{k^{video}}$ , 1/с	$r_{i,j}^{k^{video}}$ , 1/с
(1,2)	2,64	340	0	220,71	0
(2,3)	24,24	40,87	0,0036	218,04	0,019
(1,4)	1,82	0	0	429,29	0
(2,5)	10,18	299,13	0	2,65	0
(3,6)	2,93	40,87	0	218,04	0
(5,4)	2,5	0	0	2,65	0
(5,6)	5,26	109,95	0	0	0
(4,7)	38,69	0	0	429,39	2,5519
(5,8)	2,43	189,18	0	0	0
(6,9)	7,625	150,82	0	218,04	0
(7,8)	4,56	0	0	180,62	0
(8,9)	9,02	189,13	0	0	0
(7,10)	6,61	0	0	248,77	0
(8,11)	3,13	0,046	0	180,62	0
(9,12)	21,49	339,3	0,6476	217,63	0,4153
(10,11)	2,22	0	0	248,77	0
(11,12)	14,12	0,0458	0	429,36	0,03



Таблиця 4.13

**Основні QoE-показники, які обчислені за результатами розв'язання задачі маршрутизації мультимедійного трафіка з використанням потокової моделі Traffic Engineering**

Q	$Sq$	$Vq$	$MM_{SV}$	$MM_T$	$MMq$
88,1628	4,2914	3,8616	2,9025	3,8645	2,9959

#### 4.7. Тензорні моделі швидкої QoE-перемаршрутизації із захистом рівня мультимедійної якості

##### 4.7.1. Опис потокової моделі швидкої перемаршрутизації мультимедійного трафіка в телекомунікаційній мережі

Необхідність врахування особливостей процесу швидкої перемаршрутизації мультимедійного трафіка в ТКМ потребує внесення певних нововведень. Так, наприклад, разом із маршрутними змінними  $x_{i,j}^{k\ sp}$  та  $x_{i,j}^{k\ video}$ , які визначають порядок маршрутизації та балансування навантаження за основними маршрутами, необхідно ввести до розгляду та розрахувати маршрутні змінні  $\bar{x}_{i,j}^{k\ sp}$  і  $\bar{x}_{i,j}^{k\ video}$ . Ці змінні визначають частки інтенсивностей аудіо- та відеопотоків, що генеруються в ході  $k$ -ої мультимедійної сесії та протікають у каналі  $(i, j)$ , який належить резервному маршруту, відповідно.

Тоді, у процесі реалізації багатошляхової стратегії маршрутизації за аналогією до виразу (4.22) на маршрутні змінні  $\bar{x}_{i,j}^{k\ sp}$  та  $\bar{x}_{i,j}^{k\ video}$  накладаються такі обмеження:

$$\begin{cases} 0 \leq \bar{x}_{i,j}^{k^{sp}} \leq 1; \\ 0 \leq \bar{x}_{i,j}^{k^{video}} \leq 1. \end{cases} \quad (4.60)$$

Для обліку можливих втрат пакетів, викликаних перевантаженням буфера черг на вузлах ТКМ, умови збереження аудіо- й відеопотоків для резервного маршруту в межах запропонованої моделі приймає аналогічний до (4.23) та (4.24) вигляд [126]:

$$\begin{cases} \sum_{j:(i,j) \in V} \bar{x}_{i,j}^{k^{sp}} = 1, \text{ якщо } k^{sp} \in K, u_i = s_k; \\ \sum_{j:(i,j) \in V} \bar{x}_{i,j}^{k^{sp}} - \sum_{j:(j,i) \in V} \bar{x}_{i,j}^{k^{sp}} (1 - \bar{p}_{j,i}) = 0, \text{ якщо } k^{sp} \in K, u_i \neq s_k, d_k; \\ \sum_{j:(j,i) \in V} \bar{x}_{i,j}^{k^{sp}} (1 - \bar{p}_{i,j}) = \bar{b}^{k^{sp}}, \text{ якщо } k^{sp} \in K, u_i = d_k, \end{cases} \quad (4.61)$$

$$\begin{cases} \sum_{j:(i,j) \in V} \bar{x}_{i,j}^{k^{video}} = 1, \text{ якщо } k^{video} \in K, u_i = s_k; \\ \sum_{j:(i,j) \in V} \bar{x}_{i,j}^{k^{video}} - \sum_{j:(j,i) \in V} \bar{x}_{i,j}^{k^{video}} (1 - \bar{p}_{j,i}) = 0, \text{ якщо } k^{video} \in K, u_i \neq s_k, d_k; \\ \sum_{j:(j,i) \in V} \bar{x}_{i,j}^{k^{video}} (1 - \bar{p}_{i,j}) = \bar{b}^{k^{video}}, \text{ якщо } k^{video} \in K, u_i = d_k, \end{cases} \quad (4.62)$$

де  $\bar{b}^{k^{sp}}$  та  $\bar{b}^{k^{video}}$  – частки інтенсивностей аудіо- та відеопотоків  $k$ -ї мультимедійної сесії, що були успішно обслуговані мережею та доставлені до маршрутизатора-одержувача;

$\bar{p}_{i,j}$  – відсоток втрат пактів на  $j$ -му інтерфейсі  $i$ -го маршрутизатора, що входить до резервного маршруту.

Для розрахунку ймовірності втрат пакетів, що залежить від характеристик трафіка, дисципліни їхнього обслуговування та стану інтерфейсів, наприклад, для СМО М/М/1/Н, застосуємо вираз (3.3). У ньому інтенсивності агрегованого потоку  $\lambda_{i,j}$  та  $\bar{\lambda}_{i,j}$ , що направляються в канал  $(i, j)$  (1/с) за умови його використання  $k$ -м потоком в основному та резервному маршрутах відповідно, розраховуються як

$$\begin{cases} \lambda_{i,j} = \sum_{k \in K} (\lambda_{k^{sp}}^{\langle \text{вум} \rangle} x_{i,j}^{k^{sp}} + \lambda_{k^{video}}^{\langle \text{вум} \rangle} x_{i,j}^{k^{video}}); \\ \bar{\lambda}_{i,j} = \sum_{k \in K} (\lambda_{k^{sp}}^{\langle \text{вум} \rangle} \bar{x}_{i,j}^{k^{sp}} + \lambda_{k^{video}}^{\langle \text{вум} \rangle} \bar{x}_{i,j}^{k^{video}}), \end{cases} \quad (4.63)$$

у випадку, коли в разі відмови будь-якого елемента мережі всі маршрутизатори відразу перемкнуть потоки пакетів на резервні шляхи або

$$\begin{cases} \lambda_{i,j} = \lambda_{k^{sp}}^{\langle \text{вум} \rangle} x_{i,j}^{k^{sp}} + \lambda_{k^{video}}^{\langle \text{вум} \rangle} x_{i,j}^{k^{video}} + \sum_{m \in K, m \neq k} \left[ \lambda_{m^{sp}}^{\langle \text{вум} \rangle} \max(x_{i,j}^{m^{sp}}, \bar{x}_{i,j}^{m^{sp}}) + \lambda_{m^{video}}^{\langle \text{вум} \rangle} \max(x_{i,j}^{m^{video}}, \bar{x}_{i,j}^{m^{video}}) \right]; \\ \bar{\lambda}_{i,j} = \lambda_{k^{sp}}^{\langle \text{вум} \rangle} \bar{x}_{i,j}^{k^{sp}} + \lambda_{k^{video}}^{\langle \text{вум} \rangle} \bar{x}_{i,j}^{k^{video}} + \sum_{m \in K, m \neq k} \left[ \lambda_{m^{sp}}^{\langle \text{вум} \rangle} \max(x_{i,j}^{m^{sp}}, \bar{x}_{i,j}^{m^{sp}}) + \lambda_{m^{video}}^{\langle \text{вум} \rangle} \max(x_{i,j}^{m^{video}}, \bar{x}_{i,j}^{m^{video}}) \right], \end{cases} \quad (4.64)$$

коли лише на резервні шляхи перемкнуться тільки ті потоки, що проходили через елемент мережі, який відмовив.

Для забезпечення керованості процесом боротьби з перевантаженням каналів і черг у процесі використання резервних маршрутів у структуру моделі додатково вводяться умови [126]:

$$\bar{\lambda}_{i,j} < \varphi_{i,j}, \text{ якщо } (i, j) \in V. \quad (4.65)$$

До того ж у межах  $k$ -ої мультимедійної сесії інтенсивності вдало переданих через  $j$ -й інтерфейс  $i$ -го маршрутизатора пакетів аудіо- та відеопотоків за аналогією з виразом (4.26) розраховується таким чином:

$$\bar{\lambda}_{i,j}^{k,sp} = \lambda_{k,sp}^{\langle vim \rangle} \bar{x}_{i,j}^{k,sp} (1 - \bar{p}_{i,j}) \quad \text{та} \quad \bar{\lambda}_{i,j}^{k,video} = \lambda_{k,video}^{\langle vim \rangle} \bar{x}_{i,j}^{k,video} (1 - \bar{p}_{i,j}). \quad (4.66)$$

Інтенсивності втрачених пакетів аудіо- та відеопотоків на інтерфейсах маршрутизаторів, які входять до резервних шляхів, обчислюються за формулами

$$\bar{r}_{i,j}^{k,sp} = \lambda_{k,sp}^{\langle vim \rangle} \bar{x}_{i,j}^{k,sp} \bar{p}_{i,j} \quad \text{та} \quad \bar{r}_{i,j}^{k,video} = \lambda_{k,video}^{\langle vim \rangle} \bar{x}_{i,j}^{k,video} \bar{p}_{i,j}. \quad (4.67)$$

#### 4.7.2. Умови захисту рівня мультимедійної якості в ТКМ

Одночасно з умовами захисту структурних елементів мережі – вузла каналу та маршруту (3.8)–(3.10) для обслуговування мультимедійного трафіка необхідно мати у своєму розпорядженні умови захисту рівня мультимедійної якості, що мають виконуватися в процесі швидкої QoS-перемаршрутизації в телекомунікаційної мережі. Загалом модель, представлена виразами (4.22)–(4.54), дозволяє забезпечити мультимедійну якість у ТКМ уздовж основного маршруту. Тоді, аналогічно до (4.46), умови захисту рівня мультимедійної якості під час використання резервних шляхів будуть мати такий вигляд:

$$\overline{MM}_q^k \geq MM_{q \langle vim \rangle}^k, \quad (4.68)$$

де  $\overline{MM}_q^k$  – значення показника мультимедійної якості, яке забезпечується в процесі обслуговування  $k$ -го мультимедійного потоку за допомогою резервного шляху (мультишляху).

Відповідно до методики (4.29)–(4.45) [177], запропонованої в пункті (4.6.2), визначення показника мультимедійної якості для резервного шляху здійснюється за допомогою виразу

$$\overline{MM}_q = m_1 \overline{MM}_{SV} + m_2 \overline{MM}_T + m_3 \overline{MM}_{SV} \overline{MM}_T + m_4, \text{ якщо } 1 \leq \overline{MM}_q \leq 5, \quad (4.69)$$

де  $\overline{MM}_{SV}$  – показник якості передачі аудіовізуальної інформації вздовж резервного маршруту;  $\overline{MM}_T$  – показник погіршення якості внаслідок наявності затримок і розсинхронізації процесів передачі пакетів аудіо- та відеопотоків уздовж резервного маршруту [177].

Також складові виразу (4.69), а саме  $\overline{MM}_{SV}$  та  $\overline{MM}_T$ , визначаються за допомогою таких виразів:

$$\overline{MM}_{SV} = m_5 \overline{S}_q + m_6 \overline{V}_q + m_7 \overline{S}_q \overline{V}_q + m_8, \text{ якщо } 1 \leq \overline{MM}_{SV} \leq 5. \quad (4.70)$$

$$\overline{MM}_T = \mathbf{max} \{ \overline{AD} + \overline{MS}, 1 \}, \text{ якщо } 1 \leq \overline{MM}_T \leq 5. \quad (4.71)$$

$$\overline{AD} = m_9 (\overline{T}_S + \overline{T}_V) + m_{10}, \quad (4.72)$$

$$\overline{MS} = \begin{cases} \mathbf{min} [m_{11} (\overline{T}_S - \overline{T}_V) + m_{12}, 0], & \text{якщо } \overline{T}_S \geq \overline{T}_V, \\ \mathbf{min} [m_{13} (\overline{T}_V - \overline{T}_S) + m_{14}, 0], & \text{якщо } \overline{T}_S < \overline{T}_V, \end{cases} \quad (4.73)$$

де  $\overline{MS}$  – коефіцієнт, який враховує розсинхронізацію між звуком і зображенням під час передачі відповідних пакетів уздовж резервного шляху;

$\overline{AD}$  – параметр, що відображає вплив середніх затримок пакетів аудіо- ( $\overline{T}_S$ ) та відеопотоків ( $\overline{T}_V$ ), які передаються вздовж резервного шляху.

Отже, значення показника мультимедійної якості (4.69) є функцією від якості передачі пакетів аудіо- ( $\overline{S}_q$ ) та відеопотоків ( $\overline{V}_q$ ), що також безпосередньо залежать від значень середніх затримок пакетів аудіо- ( $\overline{T}_S$ ) та відеопотоків ( $\overline{T}_V$ ), а також відсотка втрат пакетів цих самих потоків, відповідно  $\overline{P}_S$  і  $\overline{P}_V$ , які передаються вздовж резервного маршруту. Загалом, з урахуванням моделі (4.64), функціональна ієрархія залежності показників QoE, NP та маршрутних змінних за умови швидкої перемаршрутизації мультимедійного трафіка в ТКМ буде виглядати, як показано на рис. 4.20.

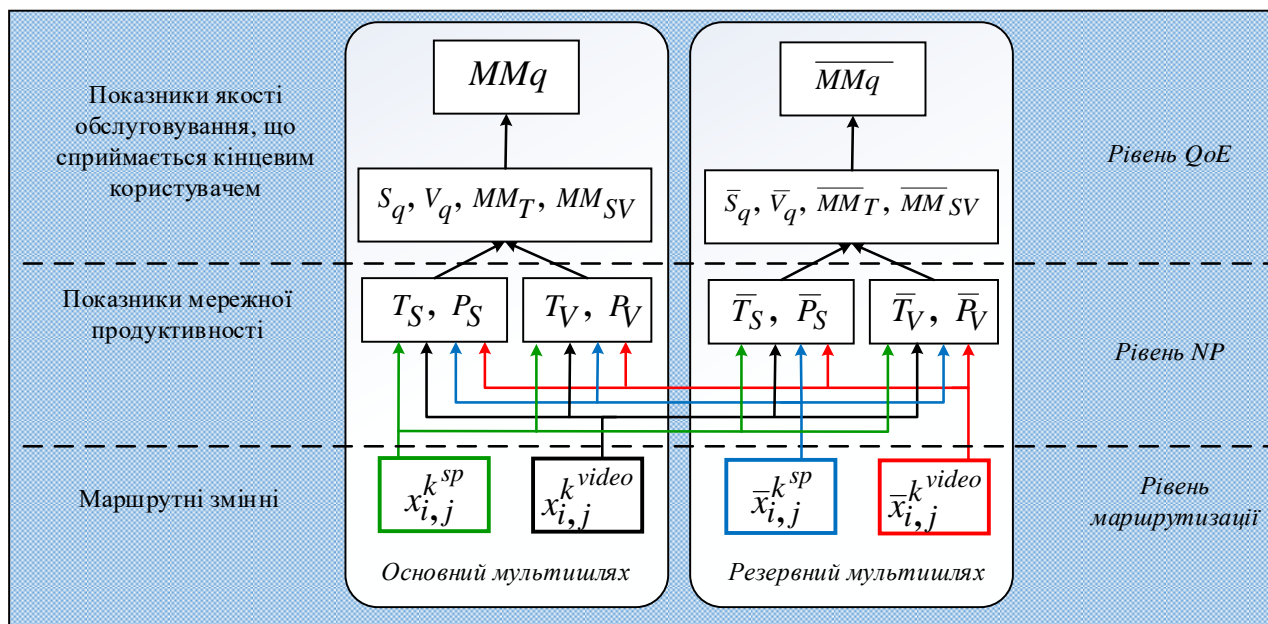


Рис. 4.20. Функціональна ієрархія залежності показників QoE, NP та маршрутних змінних у процесі швидкої перемаршрутизації мультимедійного трафіка в ТКМ

Формулювання аналітичних виразів для визначення  $\bar{T}_S$ ,  $\bar{T}_V$  та  $\bar{P}_S$ ,  $\bar{P}_V$  буде базуватися на реалізації тензорного підходу, який запропоновано в другому розділі та використано, наприклад, у підрозділі 4.3.

Так, за аналогією з (4.51) та (4.52) формули для розрахунку відсотка втрачених пакетів аудіо- та відеопотоків  $\bar{P}_S$  та  $\bar{P}_V$  приймають такий вигляд:

$$\bar{P}_S^k = (1 - \bar{b}^{k^{sp}}) \cdot 100\%, \quad (4.74)$$

$$\bar{P}_V^k = (1 - \bar{b}^{k^{video}}) \cdot 100\%. \quad (4.75)$$

У випадку використання тензорної моделі ТКМ, представленої в базисі контурів та вузлових пар, розрахунок середніх міжкінцевих затримок (мс) пакетів аудіо- та відеопотоків, що передаються вздовж резервних шляхів за аналогією з (4.47) та (4.49), буде відбуватися за допомогою таких виразів:

$$\bar{T}_S^k = \frac{\lambda \langle \text{вум} \rangle \bar{b}^{k^{sp}} - \bar{G}_{\pi\eta}^{\langle 4,2 \rangle} \left[ \bar{G}_{\pi\eta}^{\langle 4,4 \rangle} \right]^{-1} \bar{\Lambda}_{\eta-1}^{k^{sp}}}{\bar{G}_{\pi\eta}^{\langle 4,1 \rangle} - \bar{G}_{\pi\eta}^{\langle 4,2 \rangle} \left[ \bar{G}_{\pi\eta}^{\langle 4,4 \rangle} \right]^{-1} \bar{G}_{\pi\eta}^{\langle 4,3 \rangle}} \cdot 1000, \quad (4.76)$$

$$\bar{T}_V^k = \frac{\lambda \langle \text{вум} \rangle \bar{b}^{k^{video}} - \bar{G}_{\pi\eta}^{\langle 4,2 \rangle} \left[ \bar{G}_{\pi\eta}^{\langle 4,4 \rangle} \right]^{-1} \bar{\Lambda}_{\eta-1}^{k^{video}}}{\bar{G}_{\pi\eta}^{\langle 4,1 \rangle} - \bar{G}_{\pi\eta}^{\langle 4,2 \rangle} \left[ \bar{G}_{\pi\eta}^{\langle 4,4 \rangle} \right]^{-1} \bar{G}_{\pi\eta}^{\langle 4,3 \rangle}} \cdot 1000. \quad (4.77)$$

Якщо ТКМ описується за допомогою тензорної моделі, представленої в системі координат міжполюсних шляхів та внутрішніх вузлових пар (2.1)–(2.32), (2.41)–(2.50), ґрунтуючись на виразах (2.51), (2.52), (4.53) та (4.54), то середні міжкінцеві затримки пакетів (мс) аудіо- та відеопотоків  $k$ -ї мультимедійної сесії,

що передаються вздовж резервних шляхів, можна розрахувати за допомогою таких виразів:

$$\bar{T}_S^k = \frac{1000}{\lambda_{k^{sp}}^{\langle \text{вум} \rangle} \bar{b}^{k^{sp}}} \left( \bar{\Lambda}_\gamma^t \bar{E}_{\gamma\varepsilon}^{\langle 1 \rangle} \bar{\Lambda}_\gamma + \bar{\Lambda}_\gamma^t \bar{E}_{\gamma\varepsilon}^{\langle 2 \rangle} \bar{\Lambda}_\varepsilon \right), \quad (4.78)$$

$$\bar{T}_V^k = \frac{1000}{\lambda_{k^{video}}^{\langle \text{вум} \rangle} \bar{b}^{k^{video}}} \left( \bar{\Lambda}_\gamma^t \bar{E}_{\gamma\varepsilon}^{\langle 1 \rangle} \bar{\Lambda}_\gamma + \bar{\Lambda}_\gamma^t \bar{E}_{\gamma\varepsilon}^{\langle 2 \rangle} \bar{\Lambda}_\varepsilon \right). \quad (4.79)$$

Визначення проекцій метричного тензора  $G$  у різних системах координат має відбуватися з урахуванням виразів (4.63) або (4.64) залежно від обраної процедури перемикування на множину резервних шляхів.

### 4.7.3. Формалізація критеріїв оптимальності рішень задачі швидкої QoE-перемаршрутизації із захистом рівня мультимедійної якості

Задача швидкої QoE-перемаршрутизації із захистом рівня мультимедійної якості може бути представлена в оптимізаційній формі. У ході її розв'язання необхідно визначити множину маршрутних змінних  $x_{i,j}^{k^{sp}}$ ,  $x_{i,j}^{k^{video}}$  та  $\bar{x}_{i,j}^{k^{sp}}$ ,  $\bar{x}_{i,j}^{k^{video}}$ , на які накладається система обмежень (4.22)–(4.24), (4.28), (4.46) і (4.60)–(4.62), (4.65), (4.68).

Критерієм оптимальності маршрутних рішень пропонується використати умову, пов'язану з максимізацією загальної продуктивності телекомунікаційної мережі [126]:

$$\max_{x, \bar{x}, b, \bar{b}} \sum_{k \in K} \left( \lambda_{k^{sp}}^{\langle \text{вум} \rangle} b^{k^{sp}} + \lambda_{k^{video}}^{\langle \text{вум} \rangle} b^{k^{video}} + \lambda_{k^{sp}}^{\langle \text{вум} \rangle} \bar{b}^{k^{sp}} + \lambda_{k^{video}}^{\langle \text{вум} \rangle} \bar{b}^{k^{video}} \right). \quad (4.80)$$



Для забезпечення оптимального використання мережного ресурсу доцільно використовувати критерій, оснований на маршрутних метриках та пов'язаний з мінімізацією цільової функції

$$J = \sum_{k^{sp}, k^{video} \in K} \sum_{w_{i,j} \in W} h_{i,j}^x (\lambda_{k^{sp}}^{\langle vum \rangle} x_{i,j}^{k^{sp}} + \lambda_{k^{video}}^{\langle vum \rangle} x_{i,j}^{k^{video}} + \lambda_{k^{sp}}^{\langle vum \rangle} \bar{x}_{i,j}^{k^{sp}} + \lambda_{k^{video}}^{\langle vum \rangle} \bar{x}_{i,j}^{k^{video}}). \quad (4.81)$$

У корпоративних ТКМ, коли для підвищення якості обслуговування на рівні кінцевого користувача можна задіяти весь доступний мережний ресурс, за аналогією з (4.57) варто використовувати критерій вигляду

$$\sum_{k \in K} f(pr^k) \left[ MM_q^k + \overline{MM}_q^k \right] \rightarrow \max. \quad (4.82)$$

#### **4.8. Дослідження запропонованих моделей швидкої QoE-перемаршрутизації із захистом рівня мультимедійної якості**

##### **4.8.1. Дослідження тензорної моделі швидкої QoE-перемаршрутизації із захистом рівня мультимедійної якості, представленої в базисі контурів та вузлових пар**

Дослідження тензорної моделі швидкої QoE-перемаршрутизації із захистом рівня мультимедійної якості, яка представлена виразами (4.22)–(4.24), (4.28), (4.46)–(4.52), (4.60)–(4.65), (4.74)–(4.77) із критерієм оптимальності (4.80), було проведено на множині конфігурацій ТКМ. У процесі дослідження за основу була взята структура мережі, яка зображена на рис. 4.21 та складалася із 16 вузлів та 24 каналів зв'язку. Нехай між першим та шістнадцятим

маршрутизаторами передаються пакети одного мультимедійного потоку з такими характеристиками:  $\lambda_{k^{sp}}^{\langle \text{вим} \rangle} = 100$  1/с,  $\lambda_{k^{video}}^{\langle \text{вим} \rangle} = 300$  1/с.

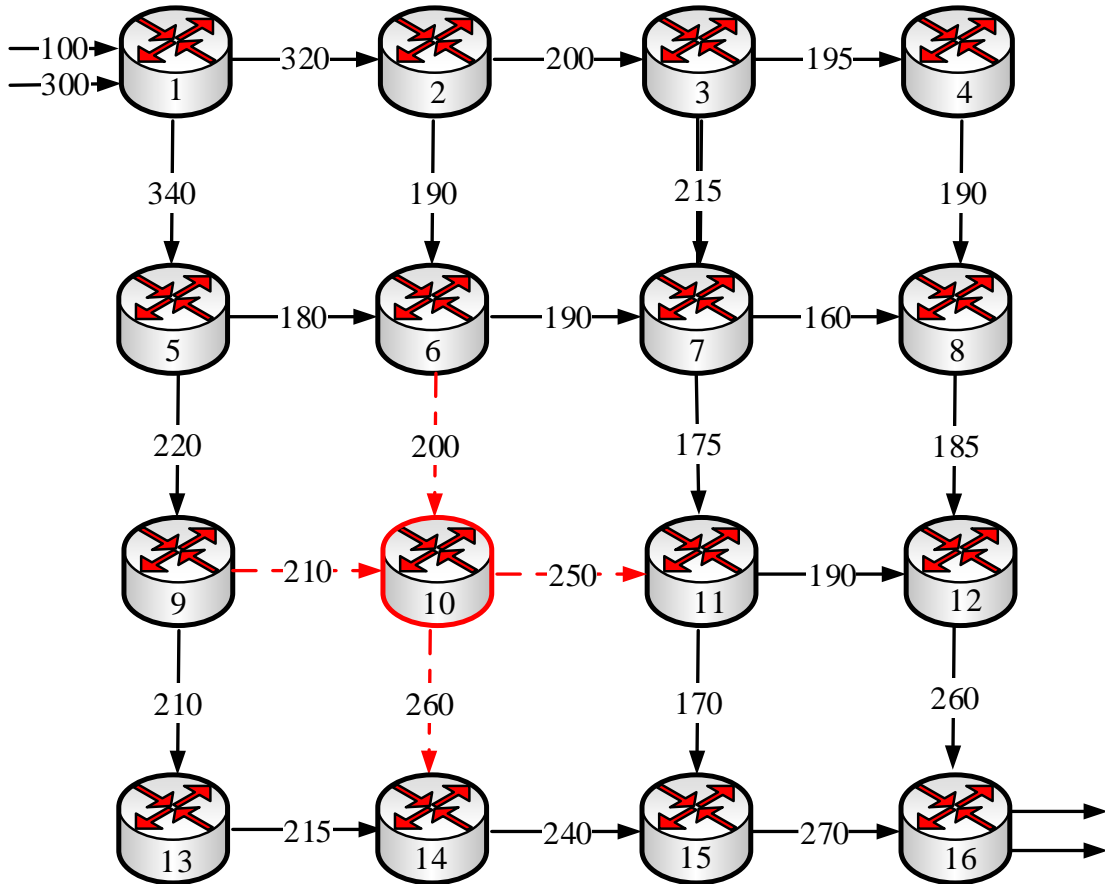


Рис. 4.21. Структура телекомунікаційної мережі, для якої необхідно розв'язати задачу швидкої QoE-перемаршрутизації із забезпеченням захисту рівня мультимедійної якості та десятого вузла

Нехай у ході швидкої перемаршрутизації необхідно забезпечити захист мультимедійної якості на рівні  $MMq_{\langle \text{вим} \rangle} = 3,5$  та десятого вузла (маршрутизатора), тобто всіх інцидентних йому каналів зв'язку. Тоді, у результаті розрахунків отримуємо порядок маршрутизації пакетів аудіо- та відеопотоків пакетів, що передаються вздовж основного (рис. 4.22) та резервного (рис. 4.23) мультишляхів відповідно.

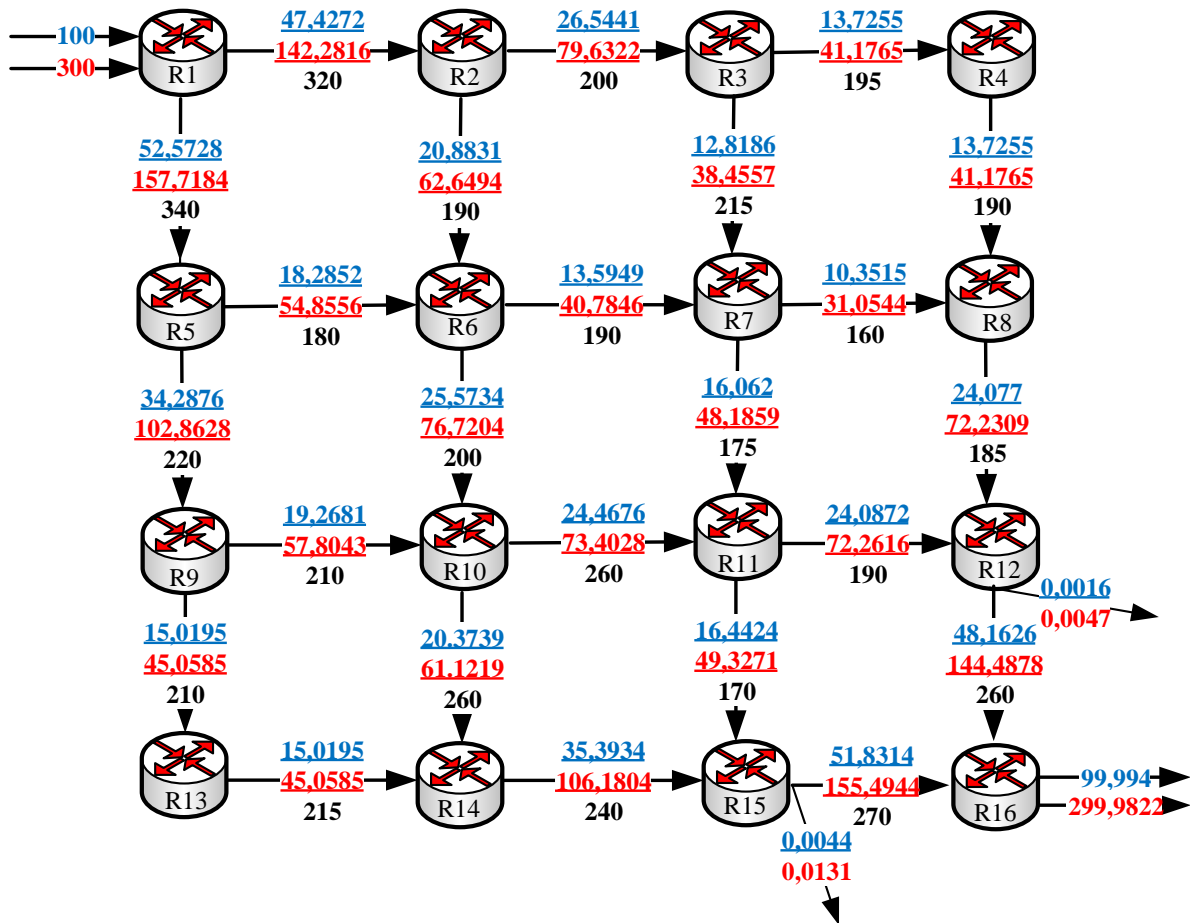


Рис. 4.22. Порядок маршрутизації пакетів аудіо- та відеопотоків, які передаються вздовж основного мультишляху

На рис. 4.22 та 4.23 в розривах каналів зв'язку вказана така інформація (згори донизу): інтенсивність аудіопотоку, інтенсивність відеопотоку, пропускна здатність каналу зв'язку. Якщо на інтерфейсі маршрутизатора втрачаються пакети, то в розриві відповідної стрілки вказано дріб, у якому в чисельнику зазначено інтенсивність втрат пакетів аудіопотоку, а в знаменнику – інтенсивність втрат пакетів відеопотоку.

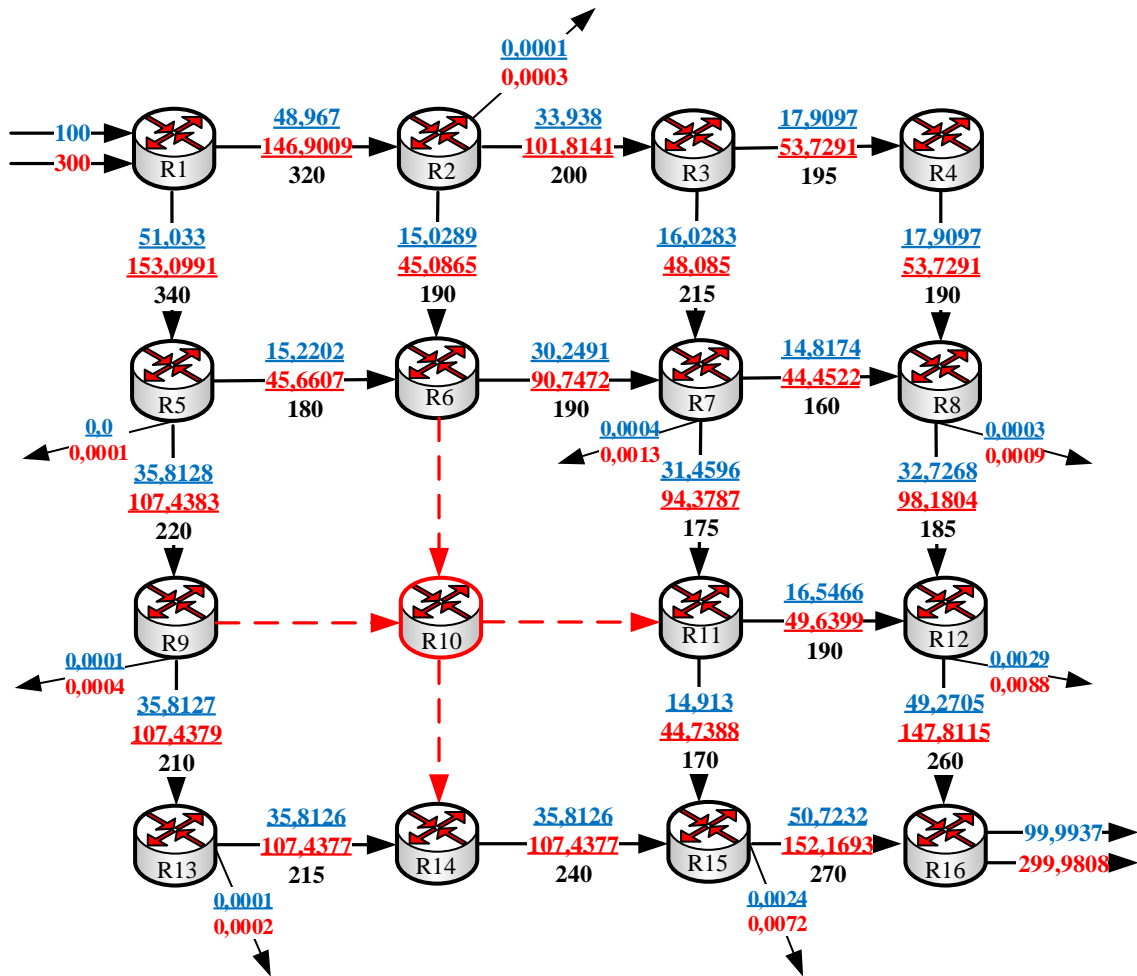


Рис. 4.23. Порядок маршрутизації пакетів аудіо- та відеопотоків, які передаються вздовж резервного мультишляху

Порядок швидкої QoE-перемаршрутизації, представлений на рис. 4.22, 4.23 і в табл. Б5, Б.6, визначив відповідні показники мультимедійної якості, які наведені в табл. 4.14.

Відповідно до змісту табл. 4.14 можна зробити висновок, що й основний, і резервний мультишляхи забезпечували заданий рівень мультимедійної якості ( $MMq_{<вим>} = 3,5$ ) в умовах відмов десятого маршрутизатора ТКМ. Характерною особливістю отриманого рішення є використання всіх доступних шляхів з рівністю середніх міжкінцевих затримок пакетів аудіо- та відеопотоків, які передаються вздовж цих маршрутів.

Таблиця 4.14

**Результати аналізу мультимедійної якості розв’язання задачі швидкої перемаршрутизації в ТКМ**

	Результати розрахунку показників QoE за умови використання основного мультишляху	Результати розрахунку показників QoE за умови використання резервного мультишляху
Показник мультимедійної якості	$MM_q = 3,5083$	$\overline{MM}_q = 3,5004$
Показник якості передачі аудіовізуальної інформації	$MM_{SV} = 3,3539$	$\overline{MM}_{SV} = 3,3530$
Показник погіршення якості внаслідок наявності затримок та розсинхронізації процесів передачі пакетів аудіо- та відеопотоків	$MM_T = 3,8768$	$\overline{MM}_T = 3,8668$
Середні затримки пакетів аудіо- та відеопотоків, мс	$T_S = T_V = 59\text{мс}$	$\overline{T}_S = \overline{T}_V = 74,5\text{мс}$
Відсоток втрачених пакетів аудіо- та відеопотоків	$P_S = P_V = 0,1\%$	$\overline{P}_S = \overline{P}_V = 0,9\%$
Оцінка мультимедійної якості [G.1070]	Деякі користувачі незадоволені	

**4.8.2. Дослідження тензорної моделі швидкої QoE-перемаршрутизації із захистом рівня мультимедійної якості, представленої в базисі міжполюсних шляхів та внутрішніх вузлових пар**

Для перевірки адекватності та ефективності розробленої тензорної моделі QoE-маршрутизації із захистом мультимедійної якості, представленої в базисі міжполюсних шляхів та внутрішніх вузлових пар (4.22)–(4.24), (4.28),

(4.46), (4.51)–(4.54), (4.60)–(4.65), (4.74), (4.75), (4.78), (4.79), (3.8)–(3.10) із критерієм оптимальності (4.82) було проведено дослідження на фрагменті телекомунікаційної мережі, структура якої наведена на рис. 2.20. Джерелом пакетів був перший маршрутизатор, а отримувачем – дванадцятий маршрутизатор. Робота кожного з інтерфейсів маршрутизаторів моделювалася СМО  $M/M/1/N$ , коли  $N=50$ .

Розглядався варіант організації однієї мультимедійної сесії з такими вимогами:

$$\lambda_{k^{sp}}^{\langle \text{вим} \rangle} = 290 \text{ 1/c}, \lambda_{k^{video}}^{\langle \text{вим} \rangle} = 450 \text{ 1/c}; MM_{q\langle \text{вим} \rangle} = 3,3. \quad (4.83)$$

У процесі швидкої QoE-перемаршрутизації необхідно було реалізувати схему захисту шостого маршрутизатора. Тоді характеристики розрахованої множини основних шляхів для аудіо- та відеопотоків у ТКМ наведені в табл. 4.15.

Отже, основний мультишлях для передачі пакетів аудіопотоку складався із семи маршрутів, тобто використовувалося максимальне число доступних шляхів. Основний мультишлях для передачі пакетів відеопотоку складався з шести маршрутів.

Середні затримки пакетів уздовж окремих шляхів доставки відрізнялись одна від одної, коливаючись від 20,8 до 32,1 мс (табл. 4.15). Проте середні міжкінцеві затримки пакетів аудіо- та відеопотоків повністю збігалися та становили приблизно 21,72 мс, що позитивно впливало на синхронізацію прибуття цих типів пакетів до отримувача та на значення  $MM_T$ .

Таблиця 4.15

**Характеристика основних шляхів, отриманих у процесі розв'язання задачі  
QoE-маршрутизації мультимедійного трафіка в ТКМ**

$\lambda^*$ (1/с)	$ P $	Характеристики розрахованих основних шляхів		
		Маршрут	$\lambda_p$ (1/с)	$\tau_p$ (мс)
Для аудіопотоку $\lambda_{k^{sp}}^{(eum)} = 290$ 1/с, $T_S = 21,7176$ мс; $P_S = 0\%$				
290	7	$R_1 \rightarrow R_2 \rightarrow R_3 \rightarrow R_6 \rightarrow R_9 \rightarrow R_{12}$	70,3251	21,3
		$R_1 \rightarrow R_2 \rightarrow R_5 \rightarrow R_6 \rightarrow R_9 \rightarrow R_{12}$	29,1661	22,6
		$R_1 \rightarrow R_2 \rightarrow R_5 \rightarrow R_8 \rightarrow R_9 \rightarrow R_{12}$	51,8499	22,7
		$R_1 \rightarrow R_2 \rightarrow R_5 \rightarrow R_8 \rightarrow R_{11} \rightarrow R_{12}$	23,3752	21,6
		$R_1 \rightarrow R_4 \rightarrow R_7 \rightarrow R_{10} \rightarrow R_{11} \rightarrow R_{12}$	63,5656	20,8
		$R_1 \rightarrow R_2 \rightarrow R_5 \rightarrow R_4 \rightarrow R_7 \rightarrow R_8 \rightarrow R_{11} \rightarrow R_{12}$	0,6392	32,1
		$R_1 \rightarrow R_4 \rightarrow R_7 \rightarrow R_8 \rightarrow R_{11} \rightarrow R_{12}$	51,0789	21,8
Для відеопотоку $\lambda_{k^{video}}^{(eum)} = 450$ 1/с; $T_V = 21,7176$ мс; $P_V = 0\%$				
470	6	$R_1 \rightarrow R_2 \rightarrow R_3 \rightarrow R_6 \rightarrow R_9 \rightarrow R_{12}$	106,69	21,3
		$R_1 \rightarrow R_2 \rightarrow R_5 \rightarrow R_6 \rightarrow R_9 \rightarrow R_{12}$	46,1	22,6
		$R_1 \rightarrow R_2 \rightarrow R_5 \rightarrow R_8 \rightarrow R_9 \rightarrow R_{12}$	86,93	22,7
		$R_1 \rightarrow R_2 \rightarrow R_5 \rightarrow R_8 \rightarrow R_{11} \rightarrow R_{12}$	25,42	21,6
		$R_1 \rightarrow R_4 \rightarrow R_7 \rightarrow R_{10} \rightarrow R_{11} \rightarrow R_{12}$	98,78	20,8
		$R_1 \rightarrow R_4 \rightarrow R_7 \rightarrow R_8 \rightarrow R_{11} \rightarrow R_{12}$	86,08	21,8

Характеристики розрахованої множини резервних шляхів для аудіо- та відеопотоків у ТКМ наведені в табл. 4.16.

Таблиця 4.16

**Характеристика резервних шляхів, отриманих у процесі розв'язання задачі  
QoE-маршрутизації мультимедійного трафіка в ТКМ**

$\lambda^*$ (1/с)	$ P $	Характеристики розрахованих основних шляхів		
		Маршрут	$\lambda_p$ (1/с)	$\tau_p$ (мс)
Для аудіопотоку $\lambda_{k^{sp}}^{\langle \text{аудіо} \rangle} = 290$ 1/с; $T_S = 60,71$ мс; $P_S = 0,2162$ %				
289,37	5	$R_1 \rightarrow R_2 \rightarrow R_5 \rightarrow R_8 \rightarrow R_9 \rightarrow R_{12}$	0,1	63,7
		$R_1 \rightarrow R_2 \rightarrow R_5 \rightarrow R_8 \rightarrow R_{11} \rightarrow R_{12}$	7,25	52,1
		$R_1 \rightarrow R_4 \rightarrow R_7 \rightarrow R_{10} \rightarrow R_{11} \rightarrow R_{12}$	253,36	61,9
		$R_1 \rightarrow R_2 \rightarrow R_5 \rightarrow R_4 \rightarrow R_7 \rightarrow R_8 \rightarrow R_{11} \rightarrow R_{12}$	0,04	72,1
		$R_1 \rightarrow R_4 \rightarrow R_7 \rightarrow R_8 \rightarrow R_{11} \rightarrow R_{12}$	28,62	51,8
Для відеопотоку $\lambda_{k^{video}}^{\langle \text{відео} \rangle} = 450$ 1/с; $T_V = 60,71$ мс; $P_V = 0,1494$ %				
449,33	5	$R_1 \rightarrow R_2 \rightarrow R_5 \rightarrow R_8 \rightarrow R_9 \rightarrow R_{12}$	274,17	63,7
		$R_1 \rightarrow R_2 \rightarrow R_5 \rightarrow R_8 \rightarrow R_{11} \rightarrow R_{12}$	61,98	52,1
		$R_1 \rightarrow R_4 \rightarrow R_7 \rightarrow R_{10} \rightarrow R_{11} \rightarrow R_{12}$	70,59	61,9
		$R_1 \rightarrow R_2 \rightarrow R_5 \rightarrow R_4 \rightarrow R_7 \rightarrow R_8 \rightarrow R_{11} \rightarrow R_{12}$	0,02	72,1
		$R_1 \rightarrow R_4 \rightarrow R_7 \rightarrow R_8 \rightarrow R_{11} \rightarrow R_{12}$	42,57	51,8

Як показано в табл. 4.16, резервні мультишляхи для передачі пакетів як аудіопотоку, так і відеопотоків склалися з п'яти маршрутів. Середні затримки пакетів уздовж окремих шляхів доставки відрізнялись одна від одної, коливаючись від 51,8 до 72,1 мс (табл. 4.16). Середні міжкінцеві затримки пакетів аудіо- та відеопотоків були ідентичними та дорівнювали приблизно 60,71 мс, що, знову ж таки, позитивно впливало на синхронізацію прибуття цих типів пакетів до отримувача та на значення  $MM_T$ .



Основні QoE-показники, які обчислені за результатами розв'язання задачі швидкої перемаршрутизації мультимедійного трафіка (табл. 4.15 і 4.16), наведено в табл. 4.17.

Таблиця 4.17

**Основні QoE-показники, обчислені для основного та резервного мультишляхів обслуговування мультимедійного трафіка (4.83)**

Тип мультишляху	Q	$Sq$	$Vq$	$MM_{SV}$	$MM_T$	$MMq$
Основний	92,7625	4,4007	4,3079	3,371	3,9009	3,5444
Резервний	87,4119	4,2706	4,1571	3,1835	3,8757	3,3166

Як показано в табл. 4.17, отримане за допомогою запропонованої тензорної моделі розв'язання задачі швидкої QoE-перемаршрутизації забезпечувало захист рівня мультимедійної якості в умовах відмов шостого маршрутизатора. Це підтверджується тим, що в разі використання як основних, так і резервних (що не проходили через шостий захищений маршрутизатор) шляхів рівень мультимедійної якості був не гірший за встановлені вимоги –  $MM_{q<вим>} = 3,3$ .

#### 4.9. Висновки до четвертого розділу

1. Із зростанням у структурі сучасного мережного трафіка доли мультимедійних потоків стають усе більш актуальними завдання щодо забезпечення заданих показників якості обслуговування, яке сприймається на рівні кінцевого користувача. Стандартами ITU-T G.107 та G.1070 визначено як перелік QoE-показників, так і методики їхнього розрахунку. За результатом проведеного аналізу встановлено, що QoE-показники залежать від множини мережних параметрів, характеристик терміналів тощо. На рівні транспортної мережі значення QoE-показників багато в чому визначаються показниками

мережної продуктивності (продуктивності мережі, середніх затримок та рівня втрат пакетів), на які також здійснюють вагомий вплив результати маршрутних рішень у ТКМ.

2. Уперше запропоновано тензорні моделі маршрутизації VoIP-трафіка із забезпеченням якості сприйняття послуг, що надаються кінцевим користувачам у телекомунікаційній мережі за R-фактором. За допомогою тензорних моделей ТКМ, представлених у базисі контурів та вузлових пар або в базисі міжполюсних шляхів та внутрішніх вузлових пар, вдалося сформулювати в аналітичному вигляді вирази для розрахунку середньої міжкінцевої затримки (4.7) або (4.9) відповідно та відсотка втрат пакетів (4.8) у ТКМ. Це дозволило отримати значення R-фактора (4.3)–(4.6) для подальшого виконання QoE-умов (4.2). Фактично умови (4.2)–(4.6) слугують додатковими обмеженнями, які накладаються на маршрутні змінні в процесі розв'язання задач QoE-маршрутизації, оскільки координати проекцій метричного тензора та тензора середніх інтенсивностей потоків у координатних шляхах мережі (2.32) є функціями від  $x_{i,j}^k$ .

3. Крім того, до критеріїв оптимальності маршрутних рішень, описаних у другому та третьому розділах роботи, введено до розгляду критерій (4.10). Це стало можливим завдяки аналітичному формулюванню QoE-показника R-фактора в межах моделі (4.1)–(4.9). Маршрутизація за критерієм оптимальності (4.10) дозволяє забезпечити диференційоване підвищення рівня QoE за показником R-фактора відповідно до значень IP-пріоритету або класу  $k$ -го VoIP-потoku пакетів. У цьому випадку на маршрутні змінні також накладаються обмеження (2.63), (2.64), (2.66), (2.71). Для забезпечення гарантій на мінімальні значення R-фактора для того чи іншого VoIP-потoku пакетів можуть вводитись обмеження (4.2).

4. Оцінено ефективність маршрутних рішень, отриманих за допомогою запропонованої тензорної моделі QoE-маршрутизації, яка представлена в базисі контурів та вузлових пар, із забезпеченням якості обслуговування за

показником R-фактора (2.63), (2.64), (2.66), (2.71) та (4.1)–(4.8) та потоковою моделлю маршрутизації (2.64)–(2.66), що базується на використанні метрики EIGRP. Обидві моделі були основані на використанні критерію оптимальності (2.75). Результати дослідження розробленої тензорної моделі QoE-маршрутизації підтвердили її працездатність, ефективність та адекватність з точки зору забезпечення заданого значення такого QoE-показника, як R-фактор (рис. 4.4 та 4.5, табл. 4.2). Залежно від завантаженості мережі виграш щодо значень R-фактора становив у середньому від 12 % до 25 %. Найбільший виграш спостерігався в області середніх та високих навантажень (до 25 %). За умови невисокої завантаженості мережі або в режимі роботи, близькому до перевантаження, виграш щодо значень R-фактора знижувався до 12 %.

5. Проведено аналіз впливу зміни вимог щодо значень R-фактора та завантаженості мережі на розв'язання задачі QoE-маршрутизації. Унаслідок розрахунків встановлено, що запропонована тензорна модель маршрутизації в ТКМ, яка представлена в базисі міжполюсних шляхів та внутрішніх вузлових пар, забезпечувала адаптивне виконання вимог щодо рівня QoE. Адаптивний характер маршрутних рішень визначався тим, що з підвищенням рівня QoE-вимог (табл. 4.3) або завантаженості мережі (табл. 4.4, рис. 4.8) збільшувався обсяг задіяного мережного ресурсу, наприклад, кількість використаних шляхів, а відповідно, і ресурс пропускної здатності каналів зв'язку ТКМ.

6. Досліджено процеси диференційованого забезпечення якості обслуговування на рівні кінцевого користувача за показником R-фактора. Отримані результати підтвердили адекватність тензорної моделі QoE-маршрутизації (2.1)–(2.32), (2.41)–(2.52), (2.75), (4.1), (4.3)–(4.6) та (4.8)–(4.10) щодо диференційованого забезпечення якості обслуговування на рівні кінцевого користувача за показником R-фактора. Продемонстровано, що за допомогою зміни співвідношення між значеннями  $f(pr^k)$  можна регулювати порядок балансування навантаження в ході розв'язання задачі

QoE-маршрутизації, диференційовано підвищуючи або знижуючи значення R-фактора для того чи іншого VoIP-потoku залежно від його пріоритету (класу) (табл. Б.1 та Б.2).

7. Проведено порівняльний аналіз за величиною R-фактора розв'язань задачі QoE-маршрутизації, отриманих за допомогою трьох моделей: запропонованої тензорної моделі (2.1)–(2.32), (2.41)–(2.52), (2.75), (4.1), (4.3)–(4.6) та (4.8)–(4.10); моделі маршрутизації (2.64)–(2.67), (2.76), (2.77), яка побудована відповідно до принципів технології Traffic Engineering; моделі маршрутизації (2.64)–(2.66), (2.75), що використовує метрику протоколу EIGRP. Як показано на рис. 4.9 та 4.10, в області невисоких навантажень вигрaш від використання запропонованої моделі становив від 7 % до 15 % порівняно з моделлю EIGRP та від 4 % до 7 % порівняно з TE-рішенням. В області високого навантаження вигрaш становив від 15 % до 31 % порівняно з моделлю EIGRP та від 7 % до 15 % порівняно з TE-рішенням. У режимі роботи ТКМ, близькому до перевантаження, значення R-фактора для всіх моделей маршрутизації різко знижувались. Вигрaш від використання запропонованого в роботі рішення становив від 13 % до 31 % порівняно з моделлю EIGRP та від 4 % до 15 % порівняно з TE моделлю. Отримані результати дослідження визначають напрям використання запропонованої моделі QoE-маршрутизації, коли спостерігається нестача мережного ресурсу, що викликана або його економією, або високим завантаженням.

8. Уперше запропоновано тензорні моделі швидкої перемаршрутизації голосового трафіка із захистом як структурних елементів мережі (каналу, вузла, маршруту), так і рівня якості сприйняття послуг, що надаються кінцевим користувачам у телекомунікаційній мережі за R-фактором. Використання тензорного підходу дозволило забезпечити заданий рівень QoE шляхом контролю за значеннями середньої міжкінцевої затримки та відсотка втрат пакетів як уздовж основного, так і резервного шляху (шляхів) мережі.

У межах запропонованих моделей задачу швидкої QoE-перемаршрутизації було сформульовано в оптимізаційній формі, де критерієм оптимальності

використовувались умови (4.19)–(4.21). Обмеженнями для двох типів тензорних моделей були загальні умови, що накладалися на маршрутні змінні, зокрема: умови реалізації одно- або багатошляхової маршрутизації (2.63), (2.64), (3.1), умови збереження потоку (2.71), (3.2), умови запобігання перевантаженню каналів зв'язку (2.66), (3.3), умови захисту каналу (3.8), вузла (3.9) та маршруту (3.10), умови забезпечення захисту рівня якості сприйняття послуг, що надаються кінцевим користувачам за показником R-фактора (4.2), (4.13) у процесі використання основного та резервного маршрутів відповідно. На низці розрахункових прикладів досліджено процес швидкої перемаршрутизації із захистом рівня QoE за показником R-фактора вздовж основного та резервного маршрутів, що підтвердило адекватність та ефективність запропонованих рішень.

9. Уперше запропоновано тензорні моделі маршрутизації мультимедійного трафіка із забезпеченням якості сприйняття послуг, що надаються кінцевим користувачам у телекомунікаційній мережі за показником мультимедійної якості із застосуванням критеріїв оптимальності маршрутних рішень (4.55)–(4.57). Використання тензорного підходу дозволило забезпечити заданий рівень QoE шляхом синхронного контролю в межах однієї мультимедійної сесії значень середньої міжкінцевої затримки та відсотка втрат для аудіо- та відеопотоків пакетів у мережі.

10. У процесі дослідження тензорної моделі QoE-маршрутизації в ТКМ, представленої в базисі контурів та вузлових пар, встановлено (рис. 4.18, табл. 4.7), що її застосування покращує рівень мультимедійної якості на 28,46 % порівняно з моделлю, основою на маршрутних метриках EIGRP, та на 16,24 % порівняно з TE-рішенням. Використання тензорної моделі QoE-маршрутизації із забезпеченням мультимедійної якості, представленої в базисі міжполюсних шляхів та внутрішніх вузлових пар (4.22)–(4.24), (4.28), (4.46), (4.51)–(4.54), (4.57), порівняно з потоковою моделлю з метрикою протоколу EIGRP, дозволило підвищити показник мультимедійної якості

(MMq) на 25,5 %, а порівняно з потоковою моделлю Traffic Engineering – на 15,2 %.

11. Уперше запропоновано систему тензорних моделей швидкої перемаршрутизації мультимедійного трафіка із захистом рівня мультимедійної якості, що надається кінцевим користувачам у телекомунікаційній мережі, у процесі реалізації схем резервування каналів, вузлів і маршруту (маршрутів). Використання тензорного підходу дозволило забезпечити заданий рівень QoE шляхом синхронного контролю в межах однієї мультимедійної сесії значень середньої міжкінцевої затримки та відсотка втрат для аудіо- та відеопотоків пакетів як уздовж основного, так і резервного шляху (шляхів) у мережі. На низці розрахункових прикладів (рис. 4.22 і 4.23, табл. 4.14–4.17) продемонстровано працездатність та адекватність отриманих рішень з точки зору забезпечення захисту рівня мультимедійної якості в процесі швидкої перемаршрутизації в умовах відмов каналів та вузлів ТКМ.

## РОЗДІЛ 5

### МОДЕЛІ ТА МЕТОДИ ІЄРАРХІЧНО-КООРДИНАЦІЙНОЇ МІЖДОМЕННОЇ МАРШРУТИЗАЦІЇ У ПРОГРАМНО- КОНФІГУРОВАНІЙ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНІЙ МЕРЕЖІ ІЗ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯМ ЯКОСТІ ОБСЛУГОВУВАННЯ

#### 5.1. Огляд відомих рішень задач ієрархічної маршрутизації в мультидомених телекомунікаційних мережах

Забезпечення заданого рівня якості обслуговування (QoS) запитів користувачів було й залишається основною метою функціонування сучасних телекомунікаційних мереж, для досягнення якої задіюються різноманітні технологічні засоби та протоколи розподілу та резервування мережних ресурсів, управління трафіком тощо. До того ж проблема забезпечення якості обслуговування вкрай загострюється в умовах значної територіальної розподіленості та гетерогенності ТКМ, що суттєво впливає на масштабованість рішень щодо управління трафіком.

Дієвим напрямком підвищення масштабованості є використання мультидомених програмно-конфігурованих мереж (SDN) [140–145], коли значний перелік функцій управління трафіком перекладається на множину контролерів мережної операційної системи, які, у свою чергу, вибудовуються в чітку функціональну ієрархію (рис. 5.1). Закріплення окремого контролера за кожним мережним доменом сприяє значному зниженню обсягу службового трафіка, який циркулює в мережі, розміру маршрутних таблиць та покращенню оперативності розв'язання задач щодо управління трафіком, серед яких важливе місце відводиться задачам маршрутизації. З іншого боку, повноцінна реалізація системи зазначених переваг потребує докорінної модернізації моделей, методів і протоколів маршрутизації з їхньою функціональною адаптацією під особливості ієрархічної архітектури SDN-контролерів і мультидоменної структури ТКМ.

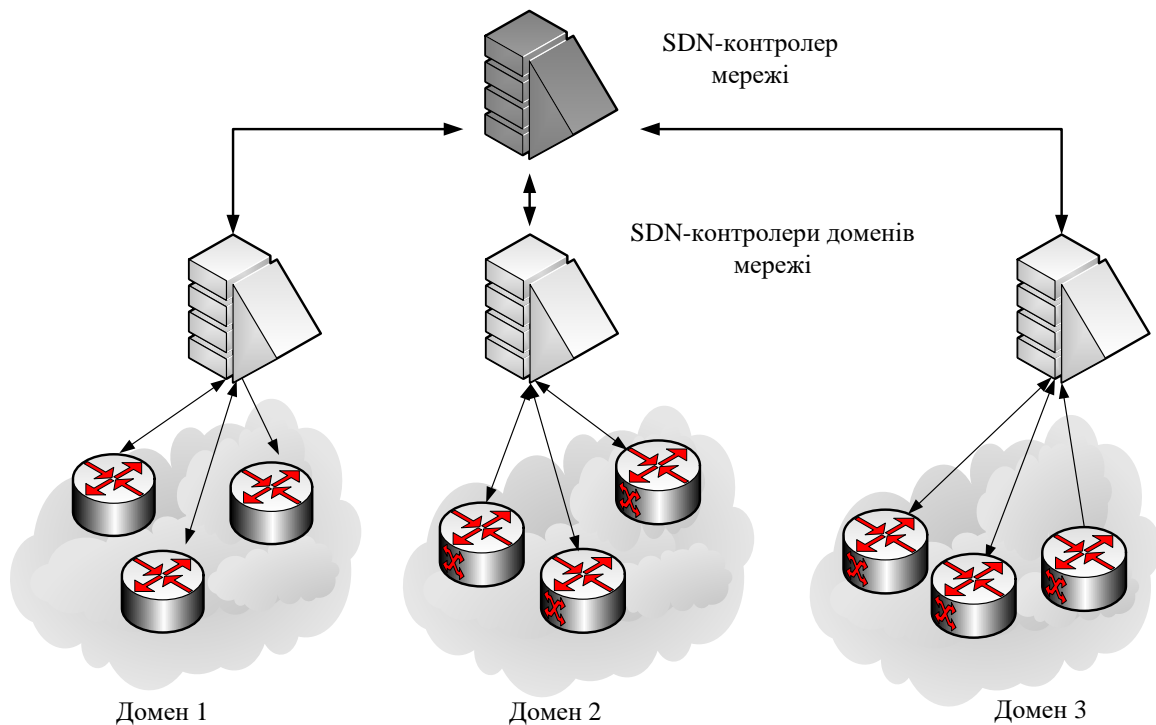


Рис. 5.1. Приклад організації мультидоменної SDN

Найбільш відомими протоколами, які реалізують принципи ієрархічної маршрутизації, вважаються OSPF та інтегрований IS-IS, що використовуються в IP-мережах, а також дещо застарілий на цей час протокол PNNI в мережі ATM [1, 6, 8–10]. Характерними властивостями цих протоколів є те, що, з одного боку, на морфологічному рівні вони підтримують мультидоменну архітектуру ТКМ, але з іншого, – на функціональному рівні – усе ще використовують для розрахунку маршрутів комбінаторний алгоритм Дейкстри, який жодним чином не враховує ієрархічних особливостей побудови мережі. Варто також додати, що врахування QoS-вимог у зазначених протоколах відбувається опосередкованим чином лише через маршрутні метрики, що, як правило, пов'язані з пропускну здатністю каналів і шляхів ІКМ. Реалізація подібного підходу сприяє покращенню загального рівня якості обслуговування в мережі, але не дозволяє гарантувати числові значення міжкінцевих QoS-показників, наприклад, середньої затримки пакетів для того чи іншого потоку.



У наукових роботах, присвячених проблематиці ієрархічної маршрутизації [251, 339–342], запропоновано множину рішень, які представлені переважно потоковими моделями та оптимізаційними методами розрахунку. У статтях [339, 342] подібні рішення адаптовані під особливості SDN архітектур. Важливою особливістю результатів, отриманих у роботах [340, 341], є те, що вони базуються на використанні положень, принципів і постулатів теорії ієрархічних багаторівневих систем [334–337]. Ці рішення, по-перше, вводять декілька ієрархічних рівнів прийняття рішень щодо маршрутизації в ТКМ, по-друге, припускають декомпозиційне подання математичної моделі ТКМ, яка може описуватися, наприклад, системою диференціальних, різницевих рівнянь [251, 252], а по-третє, обов'язковим компонентом ієрархічної маршрутизації стає процедура координації, що реалізується верхнім рівнем щодо маршрутних рішень нижніх рівнів.

На особливу увагу з точки зору реалізації QoS-маршрутизації заслуговує підхід [55, 56, 150], який оснований на використанні тензорної методології дослідження, у межах якої вдалося отримати в аналітичному вигляді умови щодо забезпечення якості обслуговування за множиною показників – пропускною здатністю, середньою затримкою, імовірністю втрат пакетів. Цей підхід також адаптований для гарантування якості обслуговування, яка сприймається на рівні користувача та оцінюється показниками рейтингу або мультимедійної якості [68, 81]. Тому в дисертаційній роботі буде запропоновано рішення задачі ієрархічно-координаційної міждоменної маршрутизації у програмно-конфігурованій телекомунікаційній мережі із забезпеченням нормованої якості обслуговування, тобто коли вимоги щодо рівня міжкінцевої QoS встановлюються для кожного домену у вигляді відповідних норм. Представлене рішення є подальшим розвитком та інтеграцією результатів, отриманих у роботах [55, 56, 340–342].

Матеріали розділу опубліковані в роботах [70, 72, 79, 81, 84, 128].

## 5.2. Декомпозиційна модель міждоменної QoS-маршрутизації в програмно-конфігурованій телекомунікаційній мережі, що складається з множини послідовно з'єднаних доменів

Нехай структура телекомунікаційної мережі представлена у вигляді орієнтованого графа

$$\Gamma = (R, W), \quad (5.1)$$

де  $R$  – це множина вершин, що моделює маршрутизатори, а  $W$  – множина дуг графа, яка описує канали зв'язку мережі.

У загальному випадку в наданні тієї чи іншої послуги в мережі генерується відповідний потік пакетів. Позначимо через  $K$  множину потоків, що циркулюють у мережі, тоді  $|K| = \tilde{K}$  – потужність множини, що кількісно характеризує загальне число потоків у ТКМ. Для кожного  $k$ -го потоку ( $k \in K$ ) вважається відомою його середня швидкість пакетів (інтенсивність) –  $\lambda_k^{(вим)}$ , яка вимірюється в пакетах за секунду (1/с) та визначає вимоги щодо обсягу пропускної здатності ТКМ, що виділяється для цього потоку.

У процесі розроблення декомпозиційної моделі міждоменної маршрутизації припустимо, що телекомунікаційна мережа складається з  $N$  взаємопов'язаних між собою підмереж – доменів. Тоді нехай кожен окремий  $p$ -й домен у ТКМ описується за допомогою підграфа  $\Gamma^p = (R^p, W^p)$  графа  $\Gamma$ , де  $V^p = \{R_i^p; i = \overline{1, m_p}\}$  – множина маршрутизаторів  $p$ -го домену,  $W^p = \{W_{i,j}^p; i, j = \overline{1, m_p}, i \neq j\}$  – множина каналів, що з'єднують маршрутизатори  $p$ -го домену, а  $m_p$  та  $n_p$  – загальна кількість відповідно маршрутизаторів та каналів зв'язку в  $p$ -му домені.

У ході декомпозиції ТКМ границя між доменами проходила через маршрутизатори мережі, як це реалізовано, наприклад, у протоколі OSPF [266, 267]:

$$R^p \cap R^q \neq 0 \text{ та } W^p \cap W^q = 0, \quad p \neq q, \quad (5.2)$$

тобто деякі маршрутизатори ТКМ можуть належати одночасно кільком суміжним доменам. Також для кожного  $p$ -го домену визначимо множину приграничних маршрутизаторів  $B^p$  ( $B^p \in R^p$ ). У свою чергу всю множину приграничних маршрутизаторів  $p$ -го домену можна поділити на дві підмножини:  $B_{in}^{p,k}$  – підмножина приграничних маршрутизаторів, через які пакети  $k$ -го потоку надходять до  $p$ -го домену;  $B_{out}^{p,k}$  – підмножина приграничних маршрутизаторів, через які пакети  $k$ -го потоку вибувають з  $p$ -го домену. Для кожного каналу зв'язку  $W_{i,j}^p$  через  $\varphi_{i,j}^p$  позначимо його пропускну здатність, яка вимірюється в пакетах за секунду (1/с).

Нехай унаслідок розв'язання задачі ієрархічно-координаційної міждоменної маршрутизації для кожного  $p$ -го домену необхідно розрахувати маршрутні змінні  $x_{i,j}^{p,k}$ , що характеризують частку інтенсивності  $k$ -го потоку пакетів, який протікає в каналі  $W_{i,j}^p \in W^p$ :

$$0 \leq x_{i,j}^{p,k} \leq 1. \quad (5.3)$$

Для кожного маршрутизатора  $p$ -го домена необхідно виконати умови збереження  $k$ -го потоку для забезпечення зв'язності внутрішньодоменних ділянок міждоменних маршрутів. Якщо  $p$ -й домен є транзитним для  $k$ -го потоку пакетів, то подібні умови мають вигляд:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{B_{in}^{p,k} \in B^p} \left( \sum_{W_{i,j}^p \in W^p} x_{i,j}^{p,k} - \sum_{W_{j,i}^p \in W^p} x_{j,i}^{p,k} \right) = 1; \\ \sum_{W_{i,j}^p \in W^p} x_{i,j}^{p,k} - \sum_{W_{j,i}^p \in W^p} x_{j,i}^{p,k} = 0; \\ \sum_{B_{out}^{p,k} \in B^p} \left( \sum_{W_{i,j}^p \in W^p} x_{i,j}^{p,k} - \sum_{W_{j,i}^p \in W^p} x_{j,i}^{p,k} \right) = -1. \end{array} \right. \quad (5.4)$$

Система рівнянь (5.4) повинна виконуватися для кожного  $k$ -го потоку пакетів окремо. Перша умова системи (5.4) охоплює всі приграничні маршрутизатори, через які  $k$ -й потік надходить до  $p$ -го домену; друга умова в (5.4) уводиться для внутрішніх маршрутизаторів  $p$ -го домену, які для  $k$ -го потоку є транзитними; третя умова має виконуватися для всіх приграничних маршрутизаторів, через які  $k$ -й потік вибуває з  $p$ -го домену.

Якщо  $k$ -й потік пакетів надійшов до ТКМ через  $p$ -й домен, а його джерелом є, наприклад, маршрутизатор  $R_i^p$ , то для цієї мережі перша умова системи (5.4) дещо спроститься і набуде вигляду

$$\sum_{E_{i,j}^p \in E^p} x_{i,j}^{p,k} = 1.$$

Решта рівнянь у системі (5.4) залишиться незмінною.

У разі, коли маршрутизатор  $R_i^p$  з  $p$ -го домену є отримувачем пакетів  $k$ -го потоку, то спроститься лише останнє рівняння системи (5.4) і матиме такий вигляд:

$$\sum_{E_{j,i}^p \in E^p} x_{j,i}^{p,k} = 1.$$

Крім того, для запобігання перевантаження каналів зв'язку  $p$ -го домену мережі важливо виконати такі умови:

$$\sum_{k \in K} \lambda_k^{(вим)} x_{i,j}^{p,k} \leq \varphi_{i,j}^p, \quad p = \overline{1, N}. \quad (5.5)$$

Позначимо через  $\lambda_{i,j}^{p,k} = \sum_{k \in K} \lambda_k^{(вим)} x_{i,j}^{p,k}$  середню інтенсивність  $k$ -го потоку пакетів, що протікає в каналі  $W_{i,j}^p \in W^p$ .

Змінні  $x_{i,j}^{p,k}$  є координатами маршрутних векторів, які, відповідно до проведеної структурної декомпозиції, підлягають функціональній декомпозиції:

$$\vec{x} = \begin{bmatrix} \vec{x}_1 \\ \vec{x}_2 \\ \vdots \\ \vec{x}_p \\ \vdots \\ \vec{x}_N \end{bmatrix}, \quad \vec{x}_p = \begin{bmatrix} \vec{x}_p^1 \\ \vec{x}_p^2 \\ \vdots \\ \vec{x}_p^k \\ \vdots \\ \vec{x}_p^{\tilde{K}} \end{bmatrix}, \quad \vec{x}_p^k = \begin{bmatrix} x_{1,2}^{p,k} \\ x_{1,3}^{p,k} \\ \vdots \\ x_{i,j}^{p,k} \\ \vdots \\ x_{m_p, m_p - 1}^{p,k} \end{bmatrix}, \quad (5.6)$$

де  $\vec{x}$  – це вектор маршрутних змінних, які визначають порядок маршрутизації потоків у ТКМ загалом;

$\vec{x}_p$  – це маршрутний вектор, що визначає порядок маршрутизації всіх потоків, які циркулюють у  $p$ -му домені;

$\vec{x}_p^k$  – це маршрутний вектор, який установлює результат розв’язання задачі маршрутизації  $k$ -го потоку в  $p$ -му домені.

У процесі розподіленого розрахунку векторів  $\vec{x}_p$  та  $\vec{x}_p^k$  у межах кожного окремого  $p$ -го домену важливо забезпечити структурну та функціональну зв’язність міждоменних маршрутів, тобто маршрутів, що проходять через множину маршрутизаторів різних доменів. Для забезпечення зв’язності міждоменних маршрутів у модель (5.1)–(5.6) вводяться умови міждоменної взаємодії [79, 81, 84]:

$$C_{p,q}^k \vec{x}_p^k = C_{q,p}^k \vec{x}_q^k, \quad p, q = \overline{1, N}, \quad p \neq q, \quad k \in K, \quad (5.7)$$

де  $C_{p,q}^k$  – матриця взаємодії  $p$ -го та  $q$ -го доменів, яка має розмір  $m_{p,q} \times m_x^{p,k}$ ;

$m_{p,q} = |R^p \cap R^q|$  – кількість маршрутизаторів, через які проходить границя між  $p$ -м і  $q$ -м доменами;

$m_x^{p,k}$  – число координат  $x_{i,j}^{p,k}$  вектора  $\vec{x}_p^k$ .

Так, для структури мережі, яка представлена на рис. 5.2 та складається з двох доменів, границя доменів проходить через два маршрутизатори. У позначеннях першого домену (рис. 5.2) – це маршрутизатори  $R_3^1$  і  $R_4^1$ , а в позначеннях другого –  $R_1^2$  та  $R_2^2$ . У розривах каналів зв’язку показана їхня пропускна здатність (1/с).

Необхідно розв’язати задачу міждоменної маршрутизації потоку пакетів, який передається, наприклад, між маршрутизаторами  $R_1^1$  та  $R_4^2$ .

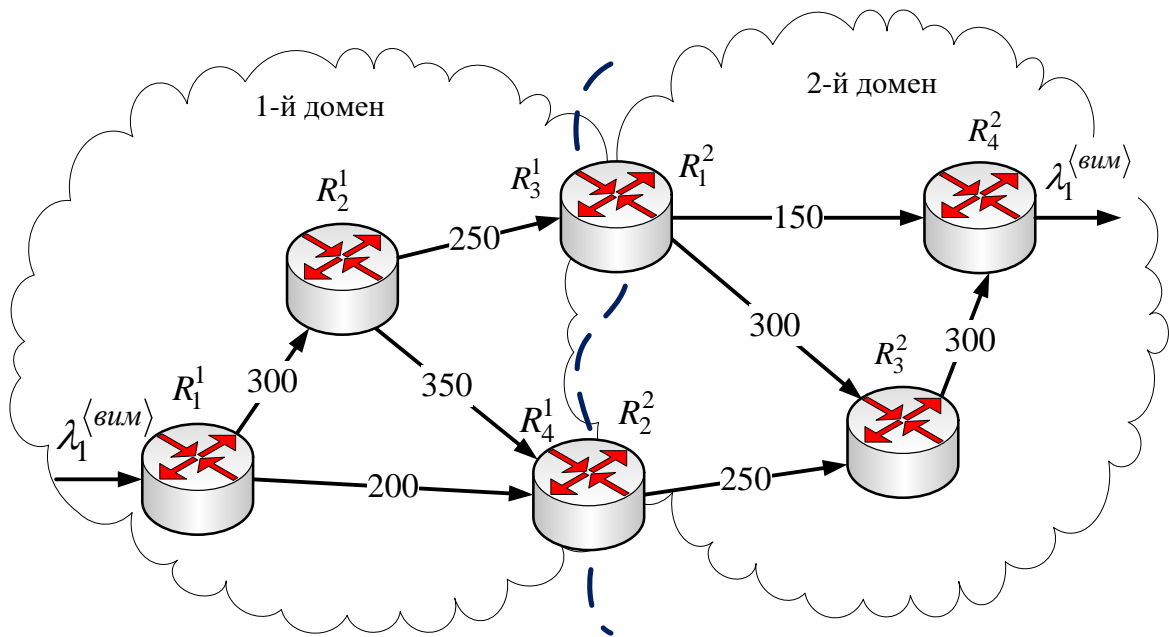


Рис. 5.2. Приклад структури ТКМ, яка підлягала дослідженню

Тоді вектори  $\bar{x}_1$  і  $\bar{x}_2$ , що визначають результат розв'язання задачі маршрутизації одного (першого) потоку в першому і другому доменах відповідно, набуватимуть такого вигляду:

$$\bar{x}_1 = \begin{bmatrix} x_{1,2}^{1,1} \\ x_{1,4}^{1,1} \\ x_{2,3}^{1,1} \\ x_{2,4}^{1,1} \end{bmatrix} \quad \text{та} \quad \bar{x}_2 = \begin{bmatrix} x_{1,3}^{2,1} \\ x_{1,4}^{2,1} \\ x_{2,3}^{2,1} \\ x_{3,4}^{2,1} \end{bmatrix}.$$

З урахуванням уведених позначень і проведеної декомпозиції умови взаємодії (5.7) першого та другого доменів (рис. 5.2) мають такий вигляд:

$$\text{для маршрутизатора } R_3^1(R_1^2): \quad x_{1,3}^{2,1} + x_{1,4}^{2,1} = x_{2,3}^{1,1};$$

$$\text{для маршрутизатора } R_4^1(R_2^2): \quad x_{2,3}^{2,1} = x_{1,4}^{1,1} + x_{2,4}^{1,1}.$$

У зв'язку з цим матриці міждоменної взаємодії для випадку симетричної структури доменів мають розмір  $(2 \times 4)$  та можуть бути записаними у формі:

$$C_{1,2}^1 = \begin{vmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \end{vmatrix} \quad \text{та} \quad C_{2,1}^1 = \begin{vmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{vmatrix}.$$

### 5.3. Умови забезпечення міжкінцевої якості обслуговування в мультидоменній телекомунікаційній мережі

Як зазначалось у другому розділі, для кожного потоку, який циркулює в ТКМ, на його швидкість передачі, середню міжкінцеву затримку пакетів (СМЗП) та ймовірність втрат пакетів встановлюються певні обмеження щодо їхніх граничних (мінімальних та/або максимальних) значень, які і визначають рівень якості обслуговування користувача. Тоді уточнені умови забезпечення QoS за середньою міжкінцевою затримкою пакетів для кожного конкретного  $k$ -го потоку в мультидоменній ТКМ (2.53) приймають вигляд

$$\tau_{MP}^k \leq \tau_{\langle don \rangle}^k. \quad (5.8)$$

Значення  $\tau_{MP}^k$  заміряється між вхідним маршрутизатором домену-джерела та вихідним маршрутизатором-отримувачем пакетів  $k$ -го потоку. Для прикладу структури ТКМ, наведеної на рис. 5.2, величина  $\tau_{\langle don \rangle}^k$  визначає гранично допустиме значення для середньої міжкінцевої затримки пакетів  $\tau_{MP}^k$ , які передаються в мультидоменній мережі між маршрутизаторами  $R_1^1$  та  $R_4^2$ .

З урахуванням мультидоменної структури ТКМ та адитивної природи часових метрик  $\tau_{MP}^k = \sum_{p=1}^N \tau_{MP}^{p,k}$  умови (5.8) можна представити в такій формі:



$$\sum_{p=1}^N \tau_{MP}^{p,k} \leq \tau_{\langle don \rangle}^k, \quad (5.9)$$

де  $\tau_{MP}^{p,k}$  – значення середньої затримки пакетів  $k$ -го потоку в  $p$ -му домені ТКМ, що заміряється залежно від типу  $p$ -го домену таким чином:

- якщо  $p$ -й домен є джерелом пакетів  $k$ -го потоку, то  $\tau_{MP}^{p,k}$  визначає величину середньої затримки пакетів, що передаються одним або множиною шляхів від маршрутизатора-джерела цього потоку до довільного приграничного маршрутизатора з підмножини  $B_{out}^{p,k}$ ;

- якщо  $p$ -й домен є отримувачем пакетів  $k$ -го потоку, то  $\tau_{MP}^{p,k}$  характеризує середню затримку пакетів, які передаються одним або множиною шляхів від довільного приграничного маршрутизатора з підмножини  $B_{in}^{p,k}$  до маршрутизатора-отримувача цього самого домену;

- якщо  $p$ -й домен є транзитним для пакетів  $k$ -го потоку, то  $\tau_{MP}^{p,k}$  визначає середню затримку пакетів, що передаються одним або множиною шляхів між довільною парою маршрутизаторів, перший з яких належить множині  $B_{in}^{p,k}$ , а другий –  $B_{out}^{p,k}$ .

У випадку підтримки мультидоменної структури ТКМ забезпечення заданих значень міжкінцевих показників якості обслуговування нерідко реалізується на підставі їхнього попереднього нормування [81]. Нехай  $\tau_{\langle don \rangle}^{p,k}$  – нормовані вимоги щодо середньої затримки пакетів  $k$ -го потоку в  $p$ -му домені ТКМ. Тобто для кожного з потоків  $k \in K$  вимоги щодо середньої міжкінцевої затримки пакетів  $\tau_{\langle don \rangle}^k$  розподіляються (нормуються) деяким чином між окремими доменами з виконанням такої умови:

$$\sum_{p=1}^N \tau_{\langle \partial on \rangle}^{p,k} \leq \tau_{\langle \partial on \rangle}^k, \quad (5.10)$$

КОЛИ

$$\tau_{MP}^{p,k} \leq \tau_{\langle \partial on \rangle}^{p,k}. \quad (5.11)$$

Отже, у випадку забезпечення нормованої якості обслуговування в мультидоменній ТКМ, крім значення  $\tau_{\langle \partial on \rangle}^k$ , наперед задаються також величини  $\tau_{\langle \partial on \rangle}^{p,k}$ , що мають враховуватися під час розрахунку як внутрішньодоменних, так і міждоменних маршрутів. Для прикладу структури ТКМ, наведеної на рис. 5.2, величина  $\tau_{\langle \partial on \rangle}^{1,1}$  визначає вимоги щодо середньої затримки пакетів, які передаються в першому домені між маршрутизаторами  $R_1^1$  та  $R_3^1$  або між  $R_1^1$  і  $R_4^1$ . Значення  $\tau_{\langle \partial on \rangle}^{2,1}$  характеризує вимоги щодо середньої затримки пакетів, які передаються в другому домені між маршрутизаторами  $R_1^2$  та  $R_4^2$  або між  $R_2^2$  і  $R_4^2$ .

Забезпечення виконання QoS-умов (5.9) або (5.10), (5.11) пов'язане з необхідністю аналітичного розрахунку значень затримок  $\tau_{MP}^{p,k}$  у кожному з доменів ТКМ. Розв'язання цієї задачі за умов (5.4) базується на використанні результатів, отриманих у другому розділі дисертаційної роботи та представлених, наприклад, виразами (2.60) та (2.62), тобто

$$\tau_{MP}^{p,k} = \frac{\Lambda_{\gamma}^t E_{\gamma \varepsilon}^{(1)} \Lambda_{\gamma}}{\lambda_k^{\langle \text{вим} \rangle}}, \quad (5.12)$$

у якому компоненти чисельника з точки зору геометризації та метризації тензорної моделі ТКМ чітко прив'язані, по-перше, до структури  $p$ -го домену мережі та параметрів його каналів в'язку, по-друге, до характеристик  $k$ -го потоку пакетів. Тоді умови забезпечення якості обслуговування за середньою міжкінцевою затримкою пакетів  $k$ -го потоку та пропускною здатністю в  $p$ -му домені ТКМ (5.11) можна записати у більш детальному вигляді

$$\frac{\Lambda_{\gamma}^t E_{\gamma\epsilon}^{(1)} \Lambda_{\gamma}}{\lambda_k^{(вим)}} \leq \tau_{(дон)}^{p,k}. \quad (5.13)$$

Проте рівняння (5.12) справедливі для випадку двополюсного варіанта структури  $p$ -го домену ТКМ, тобто у якій пакети  $k$ -го потоку передаються від одного приграничного маршрутизатора з множини  $B_{in}^{p,k}$  (або маршрутизатора-джерела) до одного приграничного маршрутизатора з множини  $B_{out}^{p,k}$  (або маршрутизатора-отримувача). Тому залежно від специфіки структурної побудови та взаємозв'язку окремих доменів ТКМ використання (5.13) у процесі розв'язання задач міждоменної QoS-маршрутизації має певні особливості.

#### **5.4. Метод ієрархічно-координаційної міждоменної маршрутизації в програмно-конфігурованій телекомунікаційній мережі із забезпеченням нормованої якості обслуговування**

У загальному випадку в структурі довільного домену ТКМ кожній з множин  $B_{in}^{p,k}$  та/або  $B_{out}^{p,k}$  можуть належати одночасно декілька маршрутизаторів, що особливо характерно для транзитних доменів. Тому для врахування подібної особливості мультидоменної архітектури ТКМ у використанні виразів (5.12) та (5.13) пропонується така методика.

1. В умовах маршрутизації  $k$ -го потоку для кожного  $p$ -го домену визначається пара маршрутизаторів –  $R_{in}^p$  та  $R_{out}^p$ , між якими буде розраховуватись та аналізуватись середня затримка пакетів  $\tau_{MP}^{p,k}$  шляхом її порівняння з  $\tau_{\langle don \rangle}^{p,k}$  (5.13). У домені, який був джерелом пакетів  $k$ -го потоку,  $R_{in}^p$  – це маршрутизатор, через який  $k$ -й потік надходив до ТКМ. Для домену, який був отримувачем пакетів  $k$ -го потоку, як  $R_{out}^p$  був маршрутизатор, через який  $k$ -й потік вибував із мережі.

2. До структури ТКМ на границях  $p$ -го домену, який взаємодіє з іншими доменами через два та більше маршрутизатори, вводяться додатково уявні маршрутизатори  $R_{in}^p$  та  $R_{out}^p$ , що за допомогою уявних каналів зв'язку стають суміжними для маршрутизаторів із множин  $B_{in}^{p,k}$  і  $B_{out}^{p,k}$  відповідно. Якщо границя між  $p$ -м та  $q$ -м доменами проходить через декілька маршрутизаторів, як це показано, наприклад, на рис. 5.3, то уявні маршрутизатори  $R_{in}^q$  і  $R_{out}^p$  збігаються.

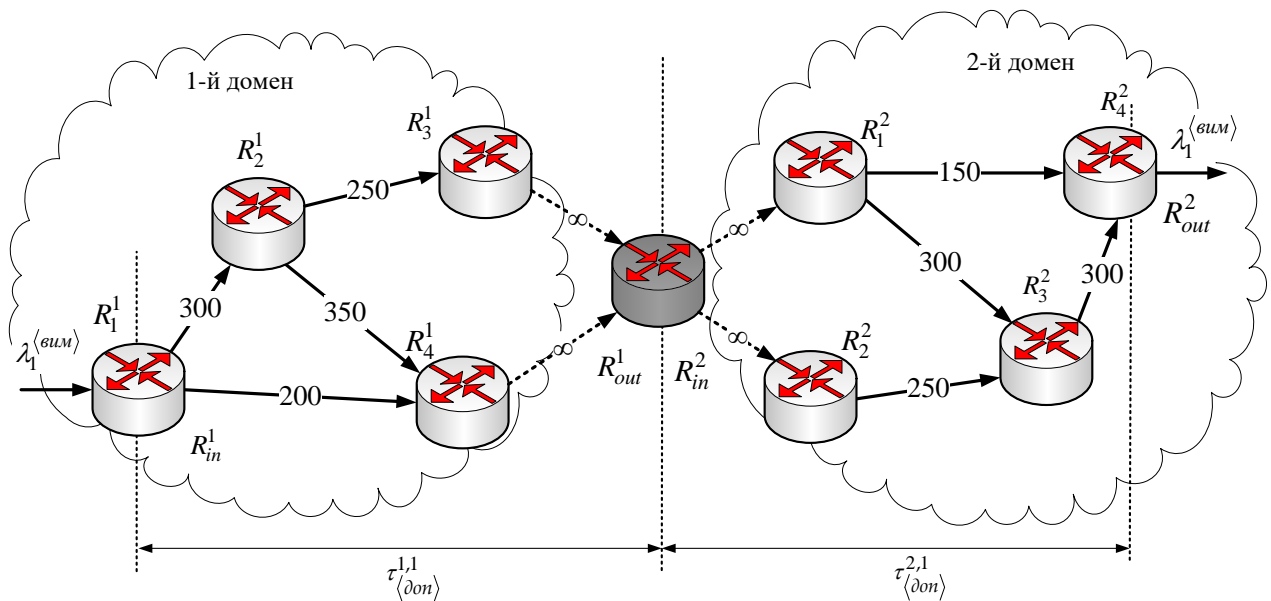


Рис. 5.3. Принцип уведення до структури ТКМ уявних маршрутизаторів та каналів зв'язку

Уведення уявних маршрутизаторів обумовлене тим, що значення СМЗП  $k$ -го потоку в  $p$ -му домені ТКМ ( $\tau_{MP}^{p,k}$ ) тепер можна оцінювати та аналізувати вже між парою маршрутизаторів  $R_{in}^p$  та  $R_{out}^p$  на підставі підходу, запропонованого в другому розділі. Для того, щоб затримки пакетів в уявних каналах зв'язку, що з'єднують реальні приграничні маршрутизатори з уявними, не впливали на розрахунок  $\tau_{MP}^{p,k}$ , їхні пропускні здатності під час розрахунків повинні прямувати до  $+\infty$ .

3. У процесі тензорної геометризації структури  $p$ -го домену ТКМ варто врахувати зазначене збільшення кількості гілок та вузлів, які моделюють реальні та уявні канали зв'язку та маршрутизатори. Це позначиться також на розмірі геометричного простору, уведених тензорів та їхніх проекцій.

Тоді множину гілок, які моделюють канали зв'язку ТКМ, що належать до  $p$ -го домену, позначимо через  $V^p = \left\{ v_z^p, z = \overline{1, n_p^{\sim}} \right\}$ , де  $n_p^{\sim}$  та  $m_p^{\sim}$  – кількість відповідно каналів зв'язку та маршрутизаторів у  $p$ -му домені з урахуванням уведених уявних елементів мережі. Так, для прикладу структури ТКМ, наведеної на рис. 5.3,  $n_1^{\sim} = n_2^{\sim} = 6$  та  $m_1^{\sim} = m_2^{\sim} = 5$ . Подібне збільшення числа каналів зв'язку та маршрутизаторів призводить до зростання кількості маршрутних змінних  $x_{i,j}^{p,k}$  із заміною умов (5.4) на наступні умови збереження потоку на маршрутизаторах  $p$ -го домену:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{E_{i,j}^p \in E^p} x_{i,j}^{p,k} - \sum_{E_{j,i}^p \in E^p} x_{j,i}^{p,k} = 1, \text{ якщо } R_i^p = R_{in}^p; \\ \sum_{E_{i,j}^p \in E^p} x_{i,j}^{p,k} - \sum_{E_{j,i}^p \in E^p} x_{j,i}^{p,k} = 0, \text{ якщо } R_i^p \neq R_{in}^p, R_{out}^p; \\ \sum_{E_{i,j}^p \in E^p} x_{i,j}^{p,k} - \sum_{E_{j,i}^p \in E^p} x_{j,i}^{p,k} = -1, \text{ якщо } R_i^p = R_{out}^p. \end{array} \right. \quad (5.14)$$

Ґрунтуючись на математичній моделі (5.1)–(5.14) в основу методу ієрархічно-координаційної міждоменної QoS-маршрутизації буде покладено розв’язання оптимізаційної задачі щодо розрахунку векторів маршрутних змінних  $\vec{x}_p^k$  ( $p = \overline{1, N}, k \in K$ ) за умови дотримання обмежень (5.3), (5.5), (5.7), (5.13) і (5.14) шляхом використання такого критерію оптимальності маршрутних рішень:

$$\min F, \quad F = \sum_{p \in N} \sum_{k \in K} (\vec{x}_p^k)^t H_p^k \vec{x}_p^k, \quad (5.15)$$

де  $H_p^k$  – діагональна матриця вагових коефіцієнтів, координатами якої, як правило [81], є маршрутні метрики каналів зв’язку  $p$ -го домену ТКМ.

Цільова функція (5.15) кількісно характеризує умовні сумарні витрати на організацію процесу міждоменної QoS-маршрутизації в ТКМ. Для надання шуканим рішенням властивостей ієрархічно-координаційної маршрутизації в ході розв’язання сформульованої оптимізаційної задачі буде використано принцип цільової координації [334–337]. Тоді, переходячи до задачі на безумовний екстремум

$$\min_{\vec{x}} F = \max_{\vec{\mu}} L,$$

необхідно максимізувати по  $\vec{\mu}$  лагранжіан вигляду

$$L = \sum_{p=1}^N \sum_{k \in K} (\vec{x}_p^k)^t H_p^k \vec{x}_p^k + \sum_{p=1}^N \sum_{q=1}^N \sum_{\substack{k \in K \\ q \neq p}} (\vec{\mu}_{p,q}^k)^t (C_{p,q}^k \vec{x}_p^k - C_{q,p}^k \vec{x}_q^k), \quad (5.16)$$

де  $\vec{\mu}$  – вектор множників Лагранжа;

$\vec{\mu}_{p,q}$  – підвектори вектора  $\vec{\mu}$ , віднесені до кожної з векторно-матричних умов взаємодії доменів (5.7).

З тієї причини, що в межах принципу цільової координації вектори множників Лагранжа  $\vec{\mu}$  розраховуються на верхньому рівні та для нижнього рівня є відомими значеннями, то вираз (5.16) можна представити в такій декомпозиційній формі:

$$L = \sum_{p=1}^N L_p, \quad (5.17)$$

$$L_p = \sum_{k \in K} (\vec{x}_p^k)^t H_p^k \vec{x}_p^k + \sum_{\substack{q=1 \\ p \neq q}}^N \sum_{k \in K_p^+} (\vec{\mu}_{p,q}^k)^t C_{p,q}^k \vec{x}_p^k - \sum_{\substack{q=1 \\ p \neq q}}^N \sum_{k \in K_p^-} (\vec{\mu}_{q,p}^k)^t C_{p,q}^k \vec{x}_p^k,$$

де  $K_p^+$  – підмножина потоків, що надходять до  $p$ -го домену з інших доменів;

$K_p^-$  – підмножина потоків, які виходять з  $p$ -го домену ( $K_p^+, K_p^- \subset K$ ).

Якщо  $k$ -й потік надходить у ТКМ через  $p$ -й домен, то  $k \in K_p^+$ . Відповідно до проведеної функціональної декомпозиції у виразі (5.17) усі складові віднесені до  $p$ -го домену, а друга й третя складові в цьому виразі відповідають за узгодження порядку маршрутизації відповідно вихідних і вхідних потоків для  $p$ -го домену ТКМ. Отже, у межах пропонованого методу загальна проблема ієрархічно-координаційної міждоменної QoS-маршрутизації формулюється як задача дворівневої оптимізації. Сам метод ієрархічно-координаційної міждоменної маршрутизації із забезпеченням нормованої якості обслуговування передбачає таку послідовність дій (рис. 5.4):

1. На нижньому ієрархічному рівні SDN-контролери доменів проводять збір та аналіз інформації про їхній стан – топологію, пропускні здатності каналів зв'язку, характеристики потоків, що циркулюють у мережі. Це дозволяє

сформуванати матриці маршрутних метрик  $H_p^k$  та міждоменної взаємодії  $C_{p,q}^k$ , що входять до виразу (5.17), та структуру обмежень (5.7).

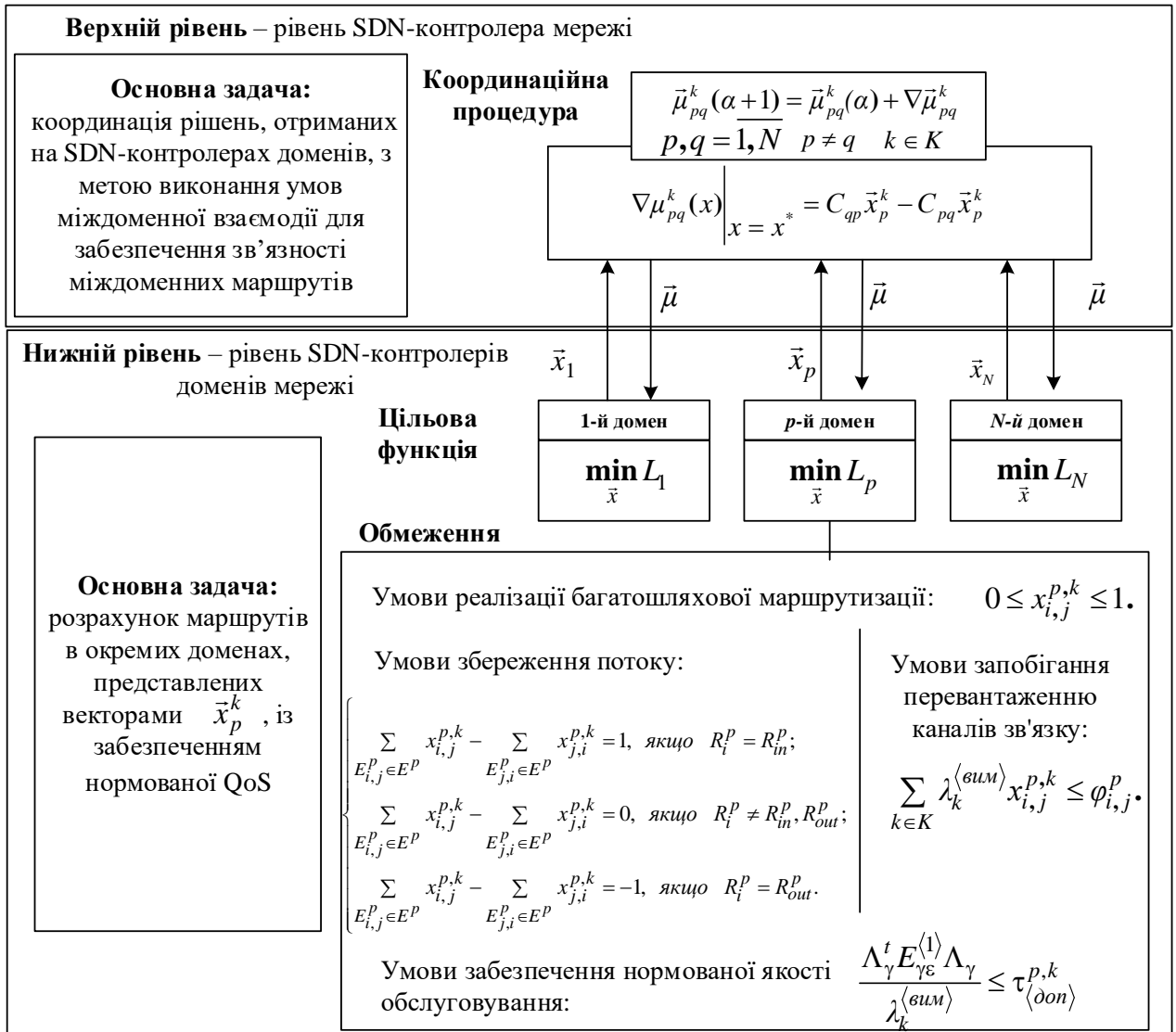


Рис. 5.4. Структура дворівневого методу ієрархічно-координаційної міждоменної маршрутизації в програмно-конфігурованій телекомунікаційній мережі із забезпеченням нормованої якості обслуговування

2. Відповідно до результатів проведеного аналізу SDN-контролери доменів здійснюють розрахунок маршрутних змінних, представлених векторами  $\bar{x}_p^k$  ( $p = \overline{1, N}$ ,  $k \in K$ ), під час мінімізації лагранжіанів (5.17) за умови обмежень (5.3),



(5.5), (5.13) і (5.14). Результати розрахунків направляються на верхній рівень – на SDN-контролер програмно-конфігурованої мережі взагалі.

3. На верхньому рівні SDN-контролер мережі здійснює координацію рішень, отриманих на нижньому рівні SDN-контролерами доменів, для забезпечення виконання умов міждоменної взаємодії (5.7) шляхом модифікації векторів множників Лагранжа в ході виконання градієнтної ітераційної процедури

$$\vec{\mu}_{p,q}^k(a+1) = \vec{\mu}_{p,q}^k(a) + \nabla \vec{\mu}_{p,q}^k, \quad (5.18)$$

де  $a$  – номер ітерації;

$\nabla \vec{\mu}_{p,q}^k$  – градієнт функції (5.16), який розраховується відповідно до отриманих на нижньому рівні результатів розв'язання задач маршрутизації  $\vec{x}_p^{k*}$  ( $p = \overline{1, N}$ ,  $k \in K$ ) у кожному конкретному домені:

$$\nabla \vec{\mu}_{p,q}^k(x) \Big|_{x = x^*} = C_{p,q} \vec{x}_p^k - C_{q,p} \vec{x}_q^k. \quad (5.19)$$

4. Модифіковані значення векторів множників Лагранжа  $\vec{\mu}_{p,q}^k$  передаються на нижній рівень (на SDN-контролери доменів) для розрахунку нових маршрутних векторів  $\vec{x}_p^k$ . Координати векторів множників Лагранжа  $\vec{\mu}_{p,q}^k$  були як модифікації маршрутних метрик для каналів зв'язку, які не утворювали зв'язний маршрут. Процес розрахунків набуває ітераційного характеру. Зв'язність міждоменних маршрутів буде забезпечуватися в процесі наближення значень координат градієнта (5.19) до нуля.

Отже, запропонований метод ієрархічно-координаційної міждоменної маршрутизації в програмно-конфігурованій інфокомунікаційній мережі із забезпеченням нормованої якості обслуговування дозволяє відмовитися від централізації управління мережею, а також розподілити управління між SDN-контролерами доменів, що позитивно впливає на масштабованість маршрутних рішень. Проте ефективність запропонованого методу ієрархічно-координаційної міждоменної маршрутизації з точки зору оптимальності та оперативності отримуваних рішень багато в чому залежить від швидкості збіжності координаційної процедури (5.18), (5.19). З технологічної точки зору мінімізація числа ітерацій процедури (5.18), (5.19) у процесі отримання шуканого оптимального рішення спрямовує на зменшення обсягу службового трафіка, що передається між ієрархічними рівнями про результати розрахунків на кожній з ітерацій, і на зменшення загального часу розв'язання задачі міждоменної маршрутизації в ТКМ загалом [339–342].

### **5.5. Дослідження запропонованого методу ієрархічно-координаційної міждоменної маршрутизації в програмно-конфігурованій телекомунікаційній мережі із забезпеченням нормованої якості обслуговування**

Проведемо дослідження запропонованого методу ієрархічно-координаційної міждоменної маршрутизації в ТКМ для підтвердження його працездатності, адекватності та ефективності отриманих результатів розрахунку. У межах розрахункового прикладу проаналізуємо характер розв'язань задачі ієрархічно-координаційної міждоменної QoS-маршрутизації для варіанта структури телекомунікаційної мережі, яка показана на рис. 5.2. Мережа складається з двох доменів (рис. 5.2). Перший і другий домени містять по чотири маршрутизатори:  $R^1 = \{R_1^1, R_2^1, R_3^1, R_4^1\}$ ,  $R^2 = \{R_1^2, R_2^2, R_3^2, R_4^2\}$ . Взаємодія між доменами здійснюється через маршрутизатори  $R_3^1$  ( $R_1^2$ ) та  $R_4^1$  ( $R_2^2$ ). Нехай

вузлом-джерелом пакетів є маршрутизатор  $R_1^1$ , що міститься в першому домені, а вузлом-отримувачем – маршрутизатор  $R_4^2$ , що знаходиться відповідно в другому домені. У розривах каналів зв'язку (рис. 5.2) показана їхня пропускна здатність (1/с). На головній діагоналі матриці  $H_p^k$  (5.15) розташовані величини  $10^8/\varphi_{i,j}^P$  за аналогією зі значеннями маршрутних метрик, які використовуються в протоколі OSPF [255, 267]. Функціонування кожного з інтерфейсів маршрутизаторів ТКМ моделювалось СМО М/М/1.

Як приклад розглянемо однопотоковий випадок, коли в процесі дослідження вимоги щодо рівня якості обслуговування в мультидоменній мережі задавалися такими параметрами  $\lambda_1^{\langle \text{вим} \rangle} = 350$  1/с та  $\tau_{\langle \text{don} \rangle}^1 = 80$  мс. У першому випадку нормування рівня якості обслуговування між доменами мережі за середньою затримкою здійснювалося таким чином:

$$\tau_{\langle \text{don} \rangle}^{1,1} = 30 \text{ мс}, \tau_{\langle \text{don} \rangle}^{2,1} = 50 \text{ мс}. \quad (5.20)$$

Тоді на рис. 5.5 представлено початкове розв'язання задачі міждоменної QoS-маршрутизації, тобто до початку роботи координаційної процедури (5.18), (5.19). На цьому рисунку в розривах каналів зв'язку вказані такі дані (згори донизу): інтенсивність потоку пакетів, пропускна здатність, а також середня затримка пакетів у цьому каналі зв'язку.

Характерною особливістю отриманого рішення (рис. 5.5) є те, що виконуються умови забезпечення нормованої QoS (5.10): середня наскрізна затримка в першому домені (від маршрутизатора-джерела  $R_1^1$  до границі доменів) становила 25,6 мс, а в другому домені (від границі доменів до маршрутизатора-отримувача  $R_4^2$ ) – 34,88 мс (табл. 5.1).

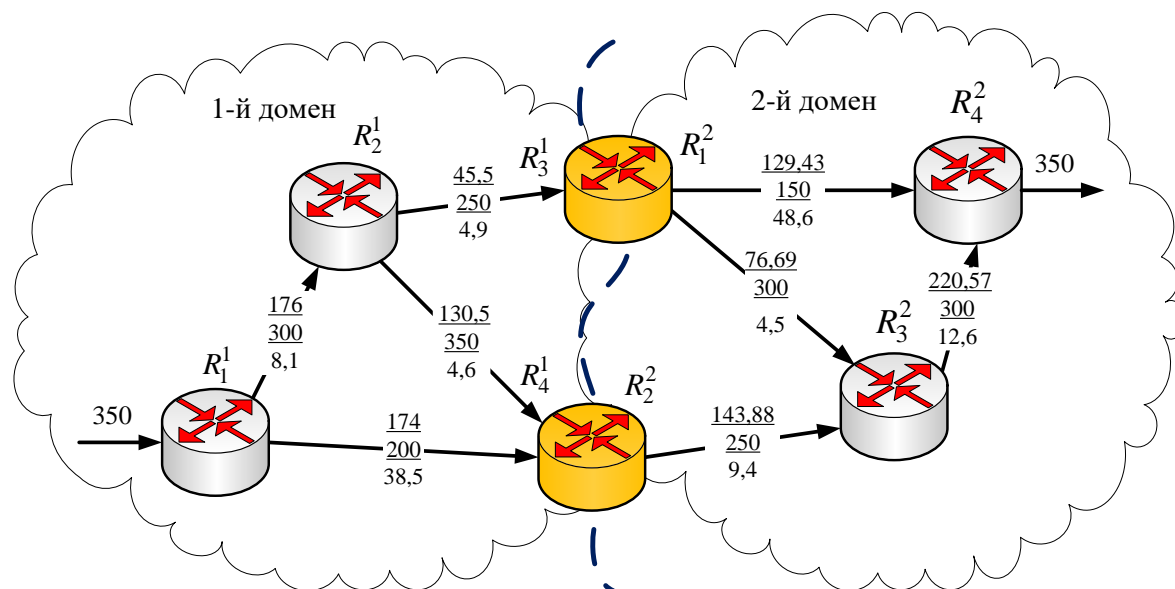


Рис. 5.5. Початкове розв'язання задачі міждоменної QoS-маршрутизації відповідно до нормованих вимог (5.20)

Проте була відсутня зв'язність міждоменних маршрутів, тому що умови міждоменної взаємодії (5.7) у разі мінімізації лагранжіанів (5.17) не виконувалися. Це пов'язано з тим, що розрахунок маршрутів для кожного з доменів відбувається незалежно один від одного на відповідних SDN-контролерах доменів.

Таблиця 5.1

### Характеристики розрахованих маршрутів, показаних на рис. 5.5

№ домену	$\lambda^{(вим)}$ (1/с)	$ P $	Характеристики розрахованих шляхів			$\tau_{MP}^{p,1}$ (мс)
			Маршрут	$\lambda_p$ (1/с)	$\tau_p$ (мс)	
1	350	3	$R_1^1 \rightarrow R_2^1 \rightarrow R_3^1$	45,5	13	25,6
			$R_1^1 \rightarrow R_2^1 \rightarrow R_4^1$	130,5	12,7	
			$R_1^1 \rightarrow R_4^1$	174	38,5	
2		3	$R_1^2 \rightarrow R_4^2$	129,43	48,6	34,88
			$R_1^2 \rightarrow R_3^2 \rightarrow R_4^2$	76,69	17,1	
			$R_2^2 \rightarrow R_3^2 \rightarrow R_4^2$	143,88	32	



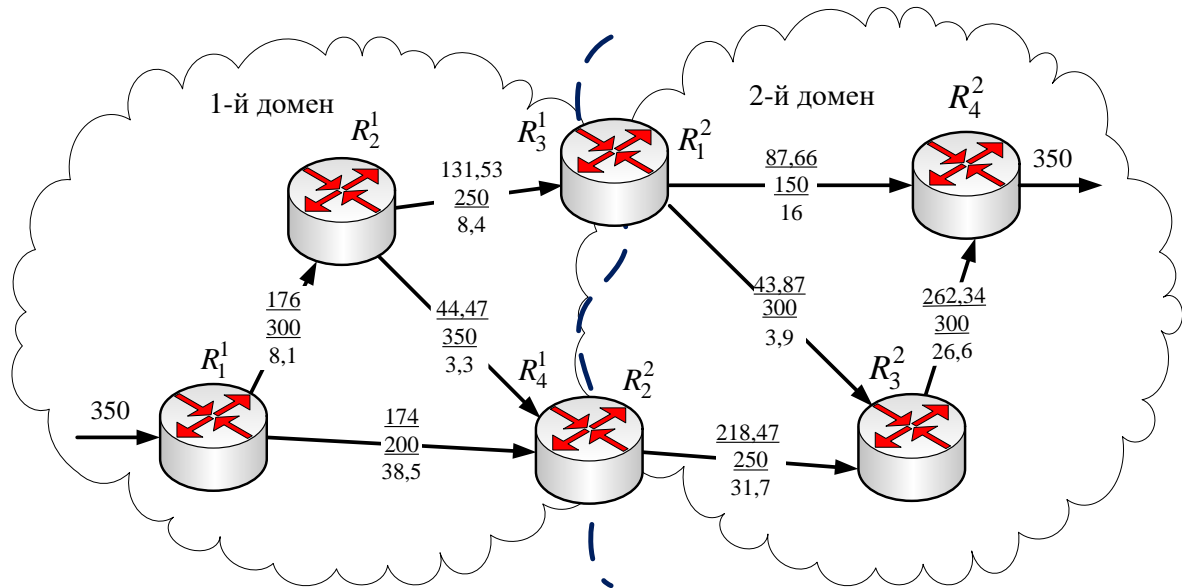


Рис. 5.7. Кінцеве (скоординоване) розв'язання задачі міждоменної QoS-маршрутизації (після третьої ітерації координаційної процедури) відповідно до нормованих вимог (5.20)

Таблиця 5.2

**Характеристики розрахованих маршрутів, показаних на рис. 5.7**

№ домену	$\lambda^{(вим)}$ (1/с)	$ P $	Характеристики розрахованих шляхів			$\tau_{MP}^{p,1}$ (мс)
			Маршрут	$\lambda_p$ (1/с)	$\tau_p$ (мс)	
1	350	3	$R_1^1 \rightarrow R_2^1 \rightarrow R_3^1$	131,53	16,5	26,84
			$R_1^1 \rightarrow R_2^1 \rightarrow R_4^1$	44,47	11,4	
			$R_1^1 \rightarrow R_4^1$	174	38,5	
2		3	$R_1^2 \rightarrow R_4^2$	87,66	16	44,24
			$R_1^2 \rightarrow R_3^2 \rightarrow R_4^2$	43,87	30,5	
			$R_2^2 \rightarrow R_3^2 \rightarrow R_4^2$	218,47	58,3	

У другому випадку нормування рівня якості обслуговування між доменами мережі за СМЗП здійснювалося зворотним способом:

$$\tau_{\langle don \rangle}^{1,1} = 50 \text{ мс}, \tau_{\langle don \rangle}^{2,1} = 30 \text{ мс}, \quad (5.21)$$

а інші QoS-вимоги залишилися без змін, тобто  $\lambda_1^{\langle вим \rangle} = 350 \text{ 1/с}$  та  $\tau_{\langle don \rangle}^1 = 80 \text{ мс}$ .

Початкове розв'язання задачі міждоменної QoS-маршрутизації, відповідно до вимог (5.21), показано на рис. 5.8, на якому, як і раніше на рис. 5.5–5.7, у розривах каналів зв'язку вказані такі дані (зверху донизу): інтенсивність потоку пакетів, пропускна здатність, а також середня затримка пакетів у цьому каналі зв'язку. Виконання QoS-вимог (5.21) підтверджувалося тим, що максимальна наскрізна затримка в першому домені становила 35,83 мс, а в другому домені – 26,71 мс, однак зв'язність міждоменних маршрутів не забезпечувалась.

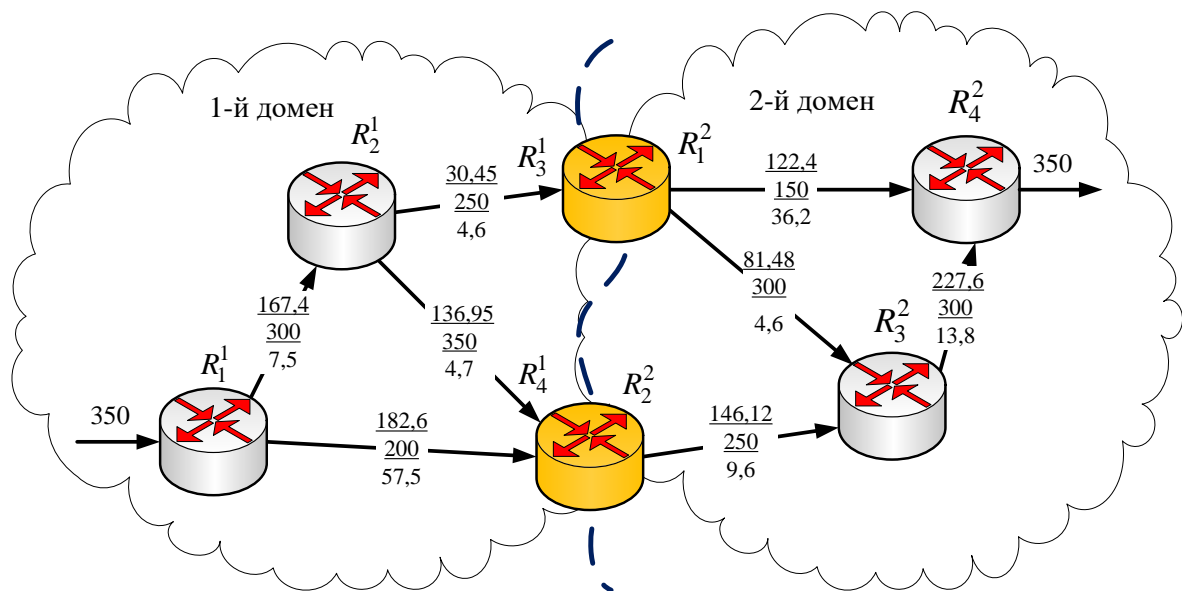


Рис. 5.8. Початкове розв'язання задачі міждоменної QoS-маршрутизації відповідно до нормованих вимог (5.21)

На координацію маршрутних рішень, як і в попередньому варіанті розрахунків, вистачило трьох ітерацій координаційної процедури (5.18), (5.19).

Результат, який отримано після першої ітерації, представлено на рис. 5.9, а скоординоване розв'язання задачі міждоменної QoS-маршрутизації відповідно до нормованих вимог (5.21) показано на рис. 5.10.

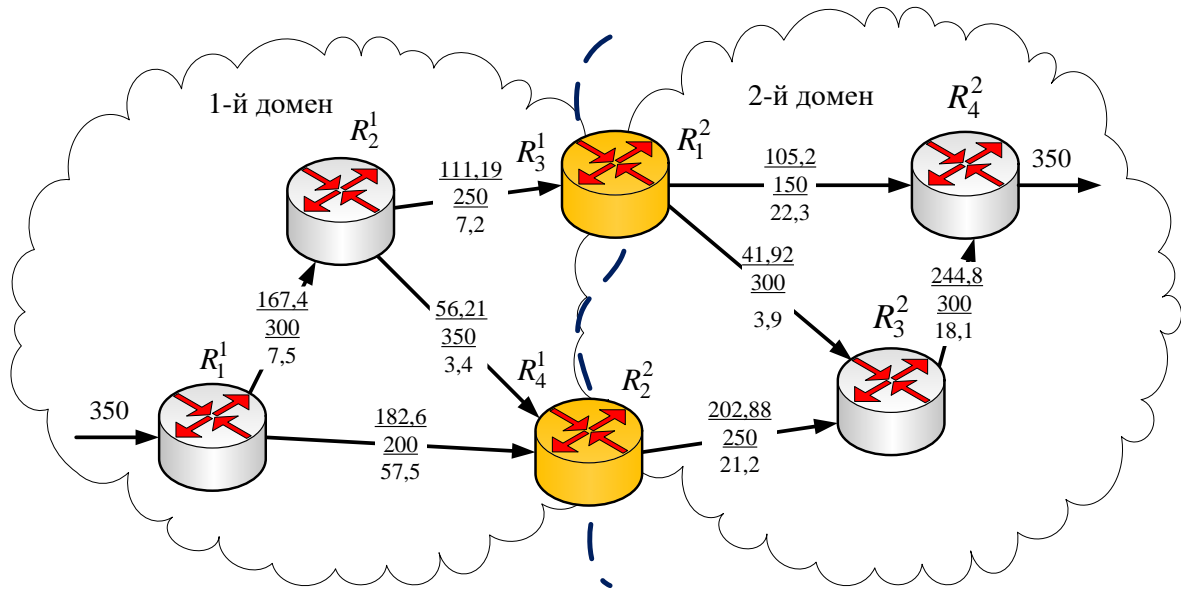


Рис. 5.9. Розв'язання задачі міждоменної QoS-маршрутизації після першої ітерації координаційної процедури відповідно до нормованих вимог (5.20)

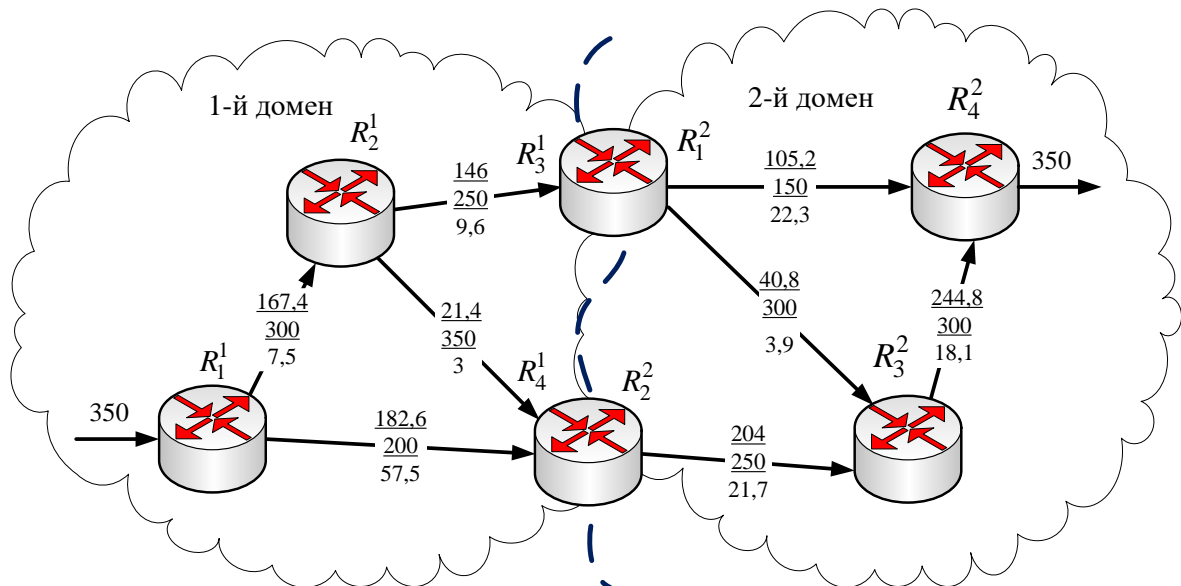


Рис. 5.10. Кінцеве (скоординоване) розв'язання задачі міждоменної QoS-маршрутизації (після третьої ітерації координаційної процедури) відповідно до нормованих вимог (5.21)



У межах цього розв'язання вдалося забезпечити не тільки зв'язність міждоменних маршрутів, але й нормовану якість обслуговування за СМЗП на рівні 37,81 мс для першого домену та 21,92 мс для другого домену ТКМ, що відповідало встановленим вимогам (5.21) (табл. 5.3).

Таблиця 5.3

### Характеристики розрахованих маршрутів, показаних на рис. 5.10

№ домену	$\lambda^{(вим)}$ (1/с)	$ P $	Характеристики розрахованих шляхів			$\tau_{MP}^{p,1}$ (мс)
			Маршрут	$\lambda_p$ (1/с)	$\tau_p$ (мс)	
1	350	3	$R_1^1 \rightarrow R_2^1 \rightarrow R_3^1$	146	17,1	37,81
			$R_1^1 \rightarrow R_2^1 \rightarrow R_4^1$	21,4	10,5	
			$R_1^1 \rightarrow R_4^1$	182,6	57,5	
2		3	$R_1^2 \rightarrow R_4^2$	105,2	22,3	21,92
			$R_1^2 \rightarrow R_3^2 \rightarrow R_4^2$	40,8	22	
			$R_2^2 \rightarrow R_3^2 \rightarrow R_4^2$	204	21,7	

Отже, у розділі запропоновано та досліджено метод ієрархічно-координаційної міждоменної маршрутизації в програмно-конфігурованій телекомунікаційній мережі із забезпеченням нормованої якості обслуговування. Проведене дослідження на низці розрахункових прикладах підтвердило працездатність та ефективність запропонованого методу. Цей метод забезпечує адаптивний характер маршрутизації потоків пакетів відповідно до зміни вимог (норм) щодо рівня якості обслуговування за показниками середньої міжкінцевої затримки пакетів та пропускну здатності як у ТКМ загалом, так і в окремих її доменах.

Метод забезпечував високу масштабованість маршрутних рішень, оскільки задачі маршрутизації в окремих доменах розв'язувалися незалежно одна від одної на підставі використання локальної інформації про стан каналів зв'язку та маршрутизаторів цих доменів, що позитивно впливає на оперативність управління ТКМ та обсяги службового трафіка. В умовах забезпечення нормованої якості обслуговування в мультидоменній ТКМ основною проблемою було скоординувати порядок маршрутизації на границі доменів, яка проходила більше ніж через один маршрутизатор. Проведені дослідження підтвердили збіжність методу до шуканих оптимальних рішень за кінцеву кількість ітерацій – у середньому за 2–3 ітерації. Число таких ітерацій могло критично зростати (до 6–8) лише у випадку, коли норми щодо рівня якості обслуговування в доменах відповідали граничним можливостям цих доменів.

#### **5.6. Метод ієрархічно-координаційної міждоменної маршрутизації в програмно-конфігурованій телекомунікаційній мережі із забезпеченням міжкінцевої якості обслуговування**

Забезпечення заданих значень міжкінцевих показників якості обслуговування в мультидоменній ТКМ на основі їхнього попереднього нормування має безперечні переваги, особливо в умовах, коли границя доменів проходить через мінімальну кількість маршрутизаторів. Проте формування норм щодо значень обраних показників якості обслуговування передбачає наявність досить точних прогнозів щодо потенційних можливостей кожного з доменів ТКМ. Установлення необґрунтованих норм (вимог), наприклад, на значення СМЗП у тому чи іншому домені (5.11), недосяжних на практиці, може призвести до значних ускладнень у забезпеченні міжкінцевої якості обслуговування в ТКМ загалом (5.10). Тому в роботі також пропонується розв'язання задачі ієрархічно-координаційної міждоменної QoS-маршрутизації в програмно-конфігурованій ТКМ без нормування рівня якості обслуговування, тобто коли необхідно виконати лише умови (5.9).

Розроблений метод також базується на декомпозиційній моделі міждоменної QoS-маршрутизації в програмно-конфігурованій телекомунікаційній мережі (5.1)–(5.7), яка детально описана в підрозділі (5.2). Основна різниця між цим методом і рішенням, представленим в підрозділі 5.4, полягає в тому, що виконання QoS-умов (5.8) забезпечується напряму через задоволення обмежень (5.9) сумісно з (5.12). Відсутність установлених норм на значення СМЗП в окремих доменах призводить до того, що завдання перевірки виконання умов (5.9) перекладається на координатор мережі загалом. Тому запропонований метод ієрархічно-координаційної міждоменної QoS-маршрутизації в програмно-конфігурованій ТКМ зберігає свою дворівневу структуру та реалізований принцип цільової координації [342], проте задачі рівнів будуть дещо переглянуті. Це обумовлено також тим, що у зв'язку з необхідністю задоволення умов (5.9) лагранжیان (5.16) змінить свою форму та зміст:

$$L = \sum_{p=1}^N \sum_{k \in K} (\bar{x}_p^k)^t H_p^k \bar{x}_p^k + \sum_{p=1}^N \sum_{\substack{q=1 \\ q \neq p}}^N \sum_{k \in K} (\bar{\mu}_{p,q}^k)^t (C_{p,q}^k \bar{x}_p^k - C_{q,p}^k \bar{x}_q^k) + \sum_{k \in K} f^k \left( \sum_{p=1}^N \tau_{MP}^{p,k} - \tau_{\langle don \rangle}^k \right), \quad (5.22)$$

де  $f^k$  – множники Лагранжа, які віднесені до кожної з QoS-умов (5.9).

Тоді кожен з лагранжіанів доменів (5.17) також дещо змінить свій запис:

$$L_p = \sum_{k \in K} (\bar{x}_p^k)^t H_p^k \bar{x}_p^k + \sum_{\substack{q=1 \\ p \neq q}}^N \sum_{k \in K_p^+} (\bar{\mu}_{p,q}^k)^t C_{p,q}^k \bar{x}_p^k - \sum_{\substack{q=1 \\ p \neq q}}^N \sum_{k \in K_p^-} (\bar{\mu}_{q,p}^k)^t C_{p,q}^k \bar{x}_p^k + \sum_{k \in K} f^k \tau_{MP}^{p,k}. \quad (5.23)$$

Задачі ієрархічних рівнів методу міждоменної QoS-маршрутизації в програмно-конфігурованій ТКМ будуть мати таке наповнення. Перший (нижній) ієрархічний рівень маршрутизації, який охоплює SDN-контролери доменів, знову відповідає за розрахунок маршрутних змінних, представлених

векторами  $\vec{x}_p^k$  ( $p = \overline{1, N}$ ,  $k \in K$ ), у процесі мінімізації лагранжіанів (5.23), але за умови обмежень (5.3), (5.5) та (5.14). Результати розрахунків передаються на верхній рівень – на SDN-контролер програмно-конфігурованої мережі загалом.

На верхньому рівні SDN-контролер мережі здійснює координацію рішень, отриманих на нижньому рівні SDN-контролерами доменів. Проте його функції розширюються: крім здійснення градієнтної процедури (5.18), (5.19), для виконання умов міждоменної взаємодії (5.7) на SDN-контролер мережі також покладаються завдання забезпечення реалізації QoS-умов (5.9) шляхом модифікації множників Лагранжа  $f^k$  ( $k \in K$ ) під час виконання ще однієї градієнтної ітераційної процедури:

$$f^k(a+1) = f^k(a) + \nabla f^k, \quad (5.24)$$

де  $\nabla f^k$  – градієнт функції (5.22), який розраховується відповідно до отриманих на нижньому рівні результатів розв’язання задач маршрутизації  $\vec{x}_p^k$  ( $p = \overline{1, N}$ ,  $k \in K$ ) у кожному конкретному домені:

$$\nabla f^k(x) \Big|_{x=x^*} = \sum_{p=1}^N \tau_{MP}^{p,k} - \tau_{\langle \text{don} \rangle}^k. \quad (5.25)$$

Модифіковані значення векторів множників Лагранжа  $\vec{\mu}_{p,q}^k$  та  $\vec{f}$  передаються на нижній рівень (на SDN-контролери доменів) для розрахунку нових маршрутних векторів  $\vec{x}_p^k$ , де координати  $f^k$   $K$ -вимірною вектора множників Лагранжа  $\vec{f}$  визначали значення QoS-метрик. Чим більше поточне

значення міжкінцевої затримки пакетів  $k$ -го потоку  $\sum_{p=1}^N \tau_{MP}^{p,k}$  перевищувало допустиме значення  $\tau_{\langle \text{доп} \rangle}^k$ , тим відповідно до (5.24) та (5.25) більшою ставала відповідна QoS-метрика, тобто координата  $f^k$ . Процес розрахунків знову набуває ітераційного характеру. Зв'язність міждоменних маршрутів (5.7) та виконання QoS-умов (5.9) буде забезпечуватися за умови таких значень градієнтів (5.19) і (5.25):

$$\nabla \bar{\mu}_{p,q}^k(x) = 0 \quad \text{та} \quad \nabla f^k(x) \leq 0.$$

Запропонований метод ієрархічно-координаційної міждоменної маршрутизації в програмно-конфігурованій телекомунікаційній мережі із забезпеченням міжкінцевої якості обслуговування буде мати структуру, наведену на рис. 5.11.

Отже, представлений метод ієрархічно-координаційної міждоменної маршрутизації в програмно-конфігурованій телекомунікаційній мережі дозволяє забезпечити допустиму міжкінцеву якість обслуговування за показником СМЗП пакетів без попереднього нормування її значень за доменами ТКМ. Це дозволяє підвищити гнучкість управління мережею, особливо у випадках, коли встановлення норм на значення  $\tau_{MP}^{p,k}$  є складною задачею прогнозування стану ТКМ. Проте ефективність запропонованого методу, який також сприяє підвищенню масштабованості маршрутних рішень у ТКМ, багато в чому залежить від швидкості збіжності координаційних процедур (5.18), (5.19) та (5.24), (5.25). Від кількості ітерацій цих процедур напряду залежать оперативність прийняття маршрутних рішень та обсяг службового навантаження (інформація про стан мережі, маршрутні таблиці), яке циркулює між SDN-контролерами різних ієрархічних рівнів. Тому окремим важливим завданням є дослідження запропонованого методу ієрархічно-координаційної

міждоменної QoS-маршрутизації з метою оцінки швидкості збіжності координаційних процедур (5.18), (5.19) та (5.24), (5.25) та аналізу чинників, що впливають на цей процес.

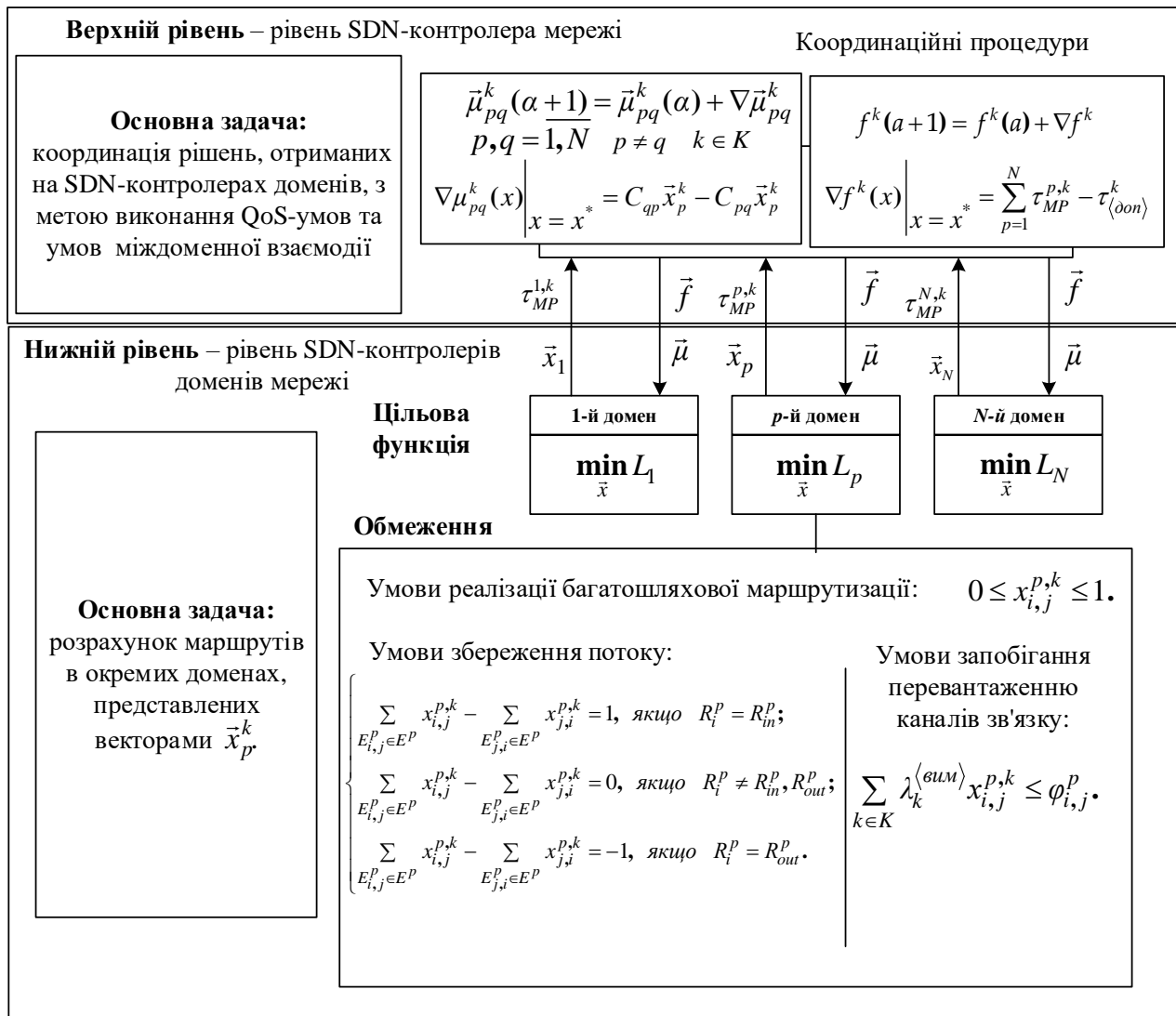


Рис. 5.11. Структура дворівневого методу ієрархічно-координаційної міждоменної маршрутизації в програмно-конфігурованій телекомунікаційній мережі із забезпеченням міжкінцевої якості обслуговування

## 5.7. Дослідження запропонованого методу ієрархічно-координаційної міждоменної маршрутизації в програмно-конфігурованій телекомунікаційній мережі із забезпеченням міжкінцевої якості обслуговування

### 5.7.1. Дослідження запропонованого методу ієрархічно-координаційної міждоменної QoS-маршрутизації під час координації рішень за середньою міжкінцевою затримкою

У першому випадку досліджувалася організація ієрархічно-координаційної міждоменної QoS-маршрутизації під час координації рішень лише за середньою міжкінцевою затримкою пакетів (5.24), (5.25). За основу була взята структура ТКМ, яка складалася з двох доменів, що були пов'язані через єдиний приграничний маршрутизатор. Подібний варіант фізичної або логічної побудови ТКМ широко використовується в організації автономних систем IP-мереж та доменів, наприклад, у використанні протоколу OSPF.

Так, на рис. 5.12 показано приклад ТКМ, що складається з двох симетричних за своєю структурою доменів, кожен з яких містив дев'ять маршрутизаторів. На цьому рисунку в розривах каналів зв'язку наведено їхню пропускну здатність ( $1/c$ ). Границя доменів проходила через один спільний для них маршрутизатор  $R_9^1 (R_1^2)$ .

Нехай у мережі передавалися пакети двох потоків, характеристики яких та вимоги щодо рівня QoS наведені в табл. 5.4.

Застосовуючи запропонований метод маршрутизації, на підставі балансування навантаження в кожному з доменів ТКМ необхідно було забезпечити заданий рівень якості обслуговування для кожного з двох потоків пакетів (табл. 5.4) і за пропускну здатністю ( $\lambda^{\langle \text{вим} \rangle}$ ), і за середньою міжкінцевою затримкою пакетів ( $\tau_{\langle \text{дон} \rangle}$ ).

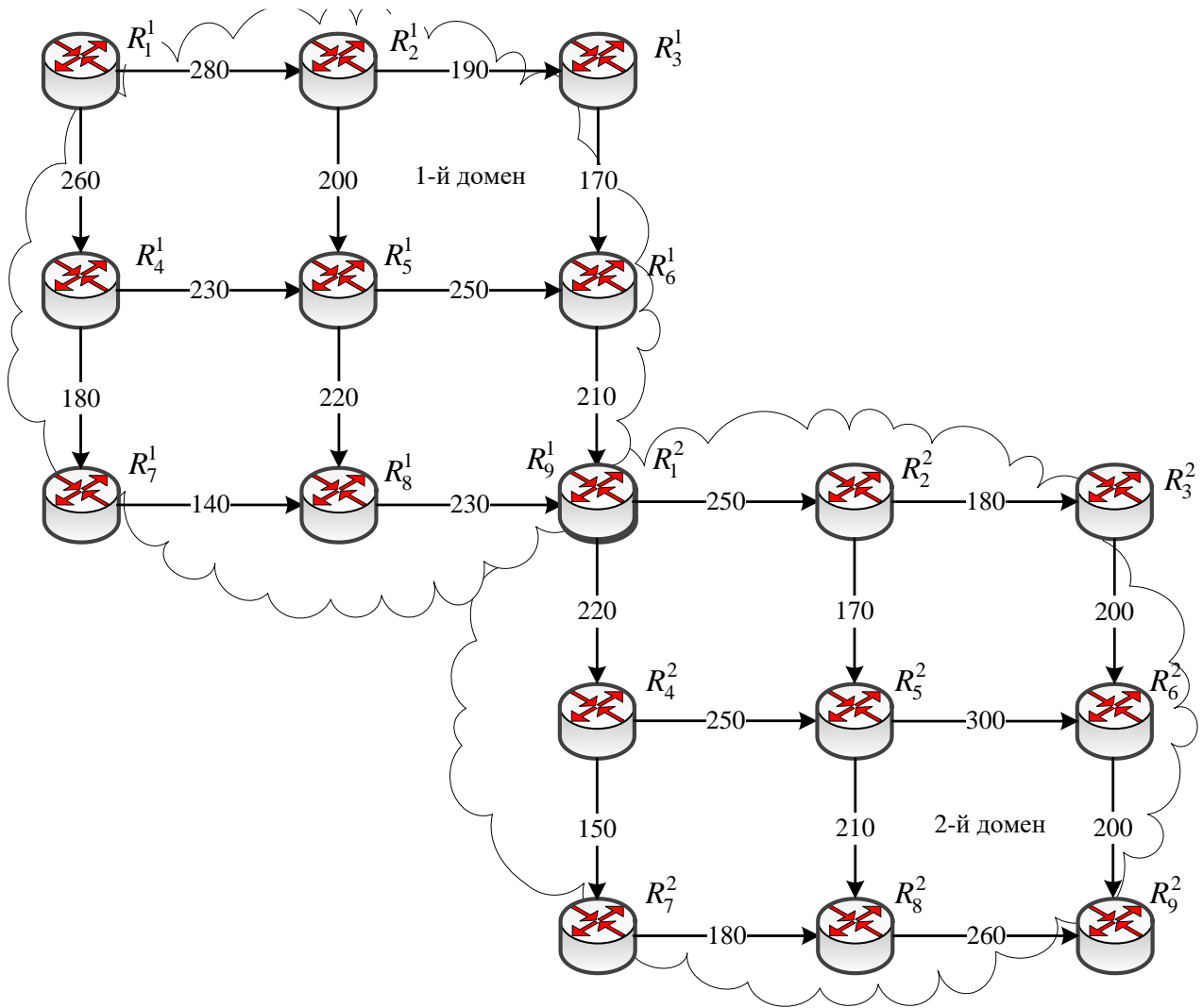


Рис. 5.12. Приклад структури дводоменної ТКМ, яка підлягала дослідженню в першому випадку

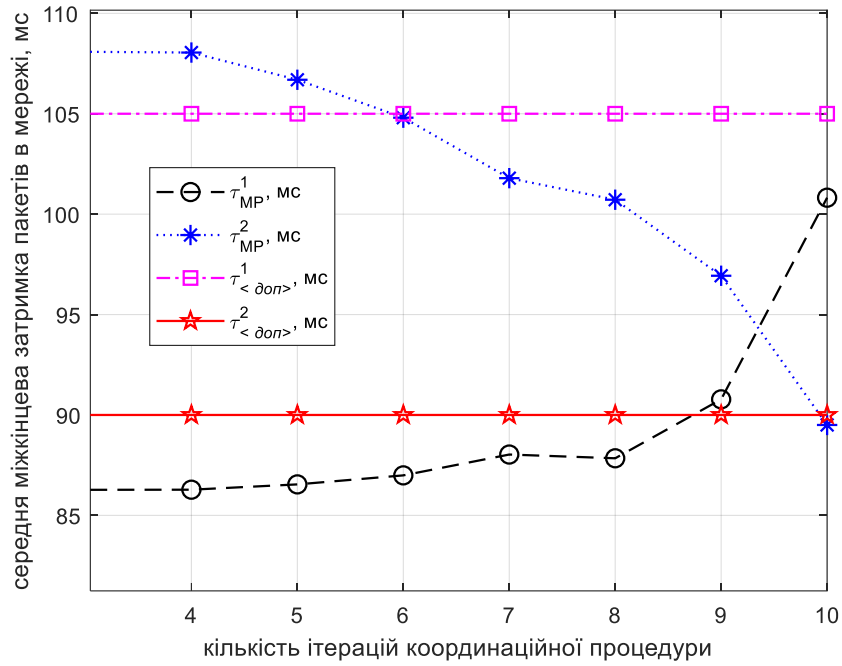
Таблиця 5.4

**Характеристики потоків пакетів, які підлягали QoS-маршрутизації в мультидоменній ТКМ (рис. 5.12)**

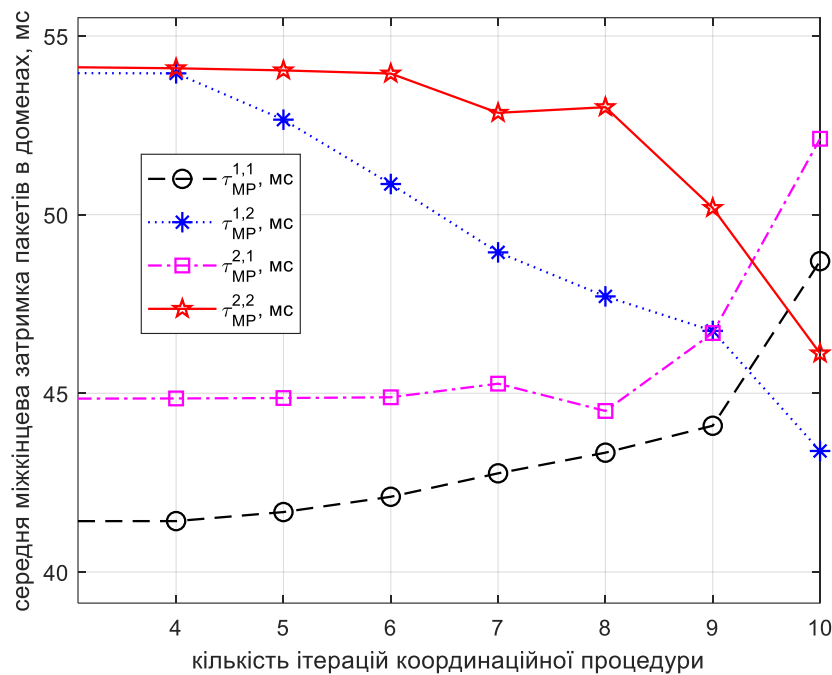
Номер потоку ( $k$ )	Маршрутизатор-джерело	Маршрутизатор-отримувач	$\lambda^{\langle \text{вим} \rangle}$ (1/с)	$\tau^{\langle \text{дон} \rangle}$ (мс)
1	$R_1^1$	$R_9^2$	150	105
2			180	90

Процес координації зручно продемонструвати на прикладі (рис. 5.13), коли для отримання шуканого рішення знадобилося десять ітерацій координаційної процедури (5.24), (5.25).





а) затримки пакетів у ТКМ загалом



б) затримки пакетів в окремих доменах мережі

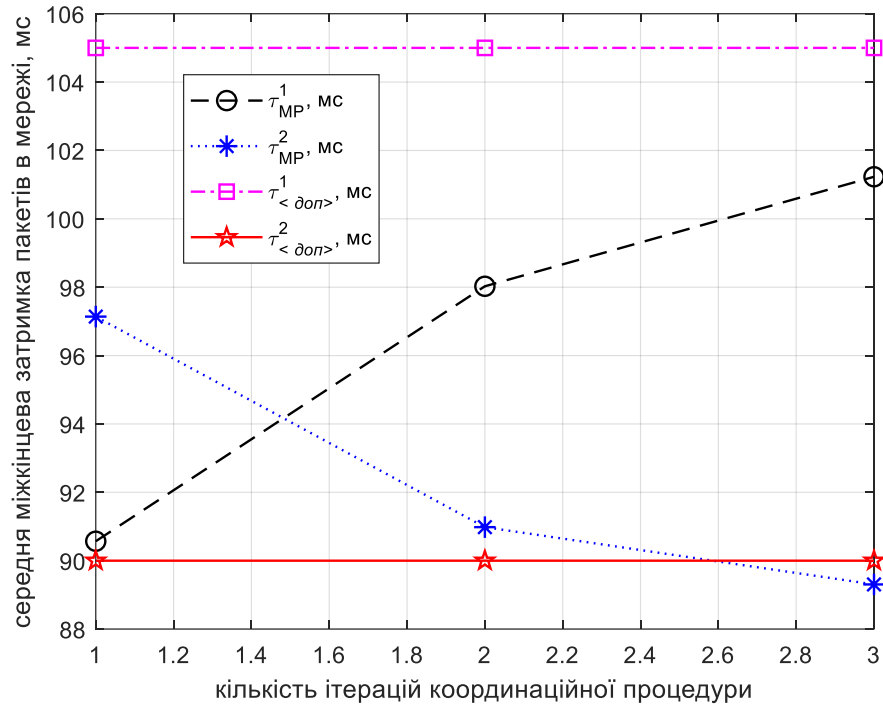
Рис. 5.13. Динаміка зміни середніх міжкінцевих затримок пакетів у ТКМ загалом (а) та за доменами (б) для кожного з двох потоків відповідно до ітерацій координаційної процедури (5.24), (5.25)

На рис. 5.13, а чітко видно, що автономний розрахунок маршрутів у доменах на перших ітераціях не приводив до виконання QoS-вимог за СМЗП у ТКМ для другого потоку пакетів, хоча для першого потоку ці вимоги задовольнялися з певним запасом міцності. Завдяки застосуванню координаційної процедури (5.24), (5.25) вдалося перерозподілити потоки і першому, і в другому домені (рис. 5.13, б) таким чином, щоб зменшити  $\tau_{MP}^2$  за рахунок деякого підвищення  $\tau_{MP}^1$ , проте без порушення QoS-вимог для першого потоку пакетів. Як показано на рис. 5.13, на десятій координаційній ітерації градієнтної процедури (5.24), (5.25) QoS-вимоги вже задовольнялися для обох потоків.

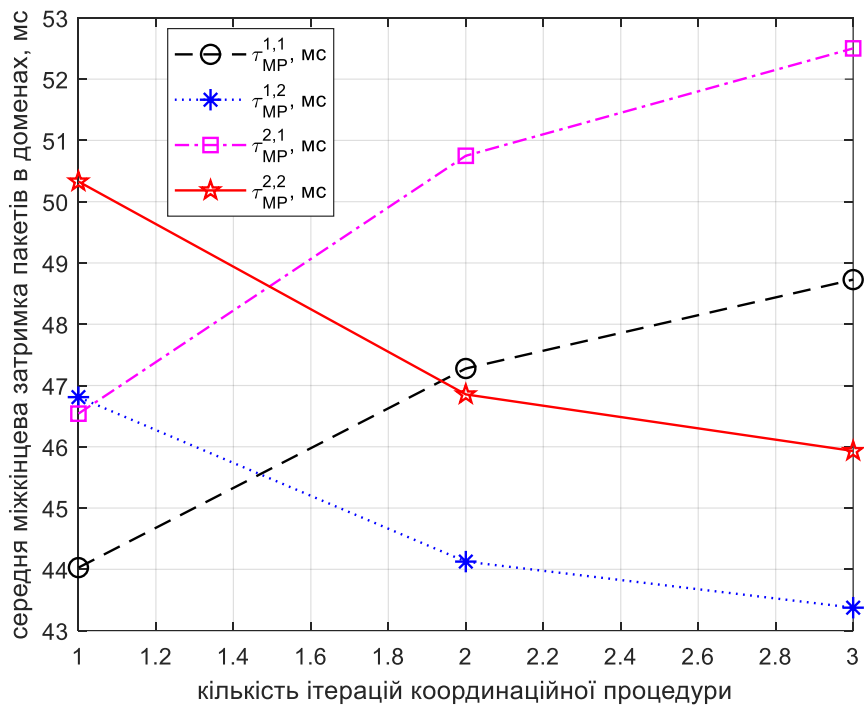
Швидкість збіжності координаційної процедури (5.24), (5.25) можна значно підвищити шляхом удосконалення її параметрів, наприклад, зробивши змінним крок пошуку, адаптувавши його значення до умов задачі. Тоді, як показано на рис. 5.14, отримати скоординоване розв'язання задачі ієрархічно-координаційної міждоменної QoS-маршрутизації можливо за три ітерації, що позитивно впливає на час розв'язання маршрутної задачі та обсяг службового навантаження в ТКМ.

У додатку Б.5.1 наведені результати розрахунків, які містять характеристики визначених шляхів та значення середньої міжкінцевої затримки пакетів у кожному з доменів ТКМ, структура якої наведена на рис. 5.12.

Отже, використання запропонованого методу ієрархічно-координаційної міждоменної маршрутизації дозволяє без перерозподілу каналного ресурсу, а лише на підставі балансування навантаження в доменах ТКМ забезпечити заданий рівень QoS за показниками продуктивності та середньої міжкінцевої затримки пакетів. Децентралізація обчислень маршрутів у кожному з доменів мережі на підставі використання локальної інформації про їхній стан дозволяє підвищити масштабованість маршрутних рішень, а введення процедур координації дає змогу забезпечити погодженість у роботі SDN-контролерів доменів із точки зору забезпечення QoS.



а) затримки пакетів у ТКМ загалом



б) затримки пакетів в окремих доменах мережі

Рис. 5.14. Динаміка зміни середніх міжкінцевих затримок пакетів у ТКМ загалом (а) та за доменами (б) для кожного з двох потоків відповідно до ітерацій координаційної процедури (5.24), (5.25)

### 5.7.2. Дослідження запропонованого методу ієрархічно-координаційної міждоменної QoS-маршрутизації під час координації рішень за середньою міжкінцевою затримкою та зв'язністю міждоменних маршрутів

У другому випадку досліджувалася організація ієрархічно-координаційної міждоменної QoS-маршрутизації під час координації рішень і за середньою міжкінцевою затримкою пакетів (5.24), (5.25), і за зв'язністю міждоменних маршрутів (5.18), (5.19). У процесі дослідження, як приклад, за основу була взята структура ТКМ, що також складалася з двох доменів, які містили по вісім маршрутизаторів та взаємодіяли через два приграничних маршрутизатори (рис. 5.15). На рис. 5.15 за аналогією з рис. 5.12 у розривах каналів зв'язку наведено їхню пропускну здатність (1/с).

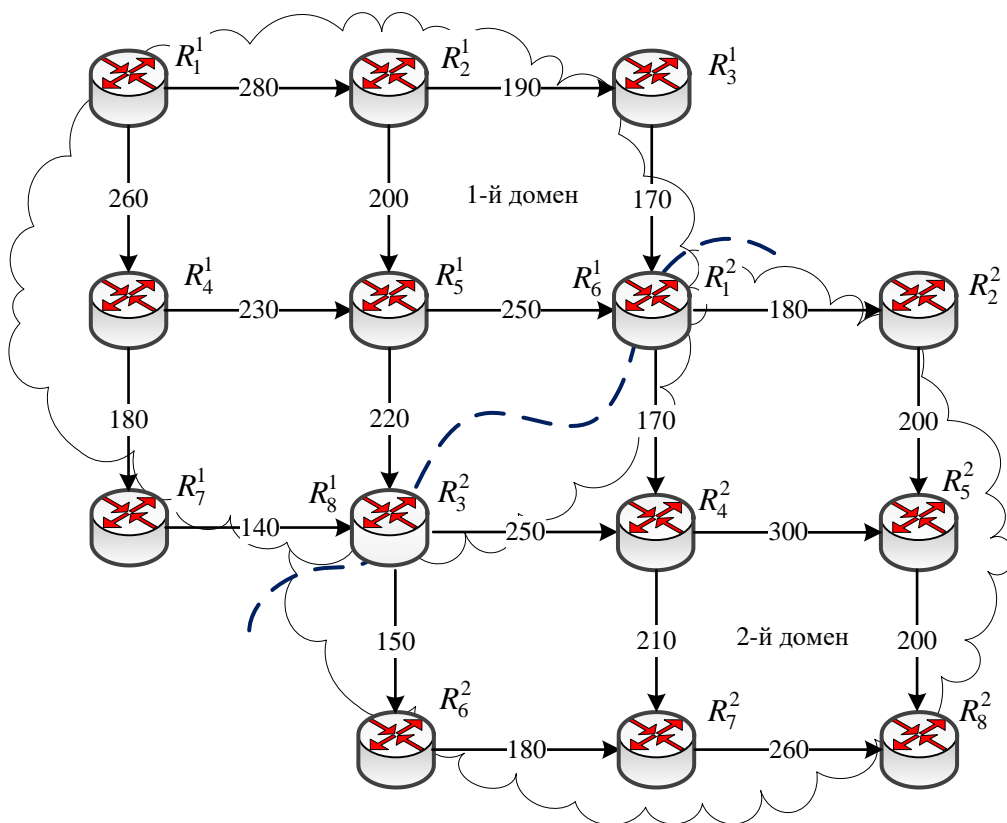


Рис. 5.15. Приклад структури дводоменної ТКМ, яка підлягала дослідженню в другому випадку

Нехай у мережі передавалися пакети двох потоків, характеристики яких та вимоги щодо рівня QoS наведені в табл. 5.5.

Таблиця 5.5

**Характеристики потоків пакетів, які підлягали QoS-маршрутизації в мультидоменній ТКМ (рис. 5.15)**

Номер потоку ( $k$ )	Маршрутизатор-джерело	Маршрутизатор-отримувач	$\lambda_{\langle \text{вим} \rangle}$ (1/с)	$\tau_{\langle \text{дон} \rangle}$ (мс)
1	$R_1^1$	$R_8^2$	150	90
2			120	70

Тоді на рис. 5.16 представлено розв'язання задачі ієрархічно-координаційної міждоменної QoS-маршрутизації з координацією як за середньою міжкінцевою затримкою, так і за зв'язністю міждоменних маршрутів.

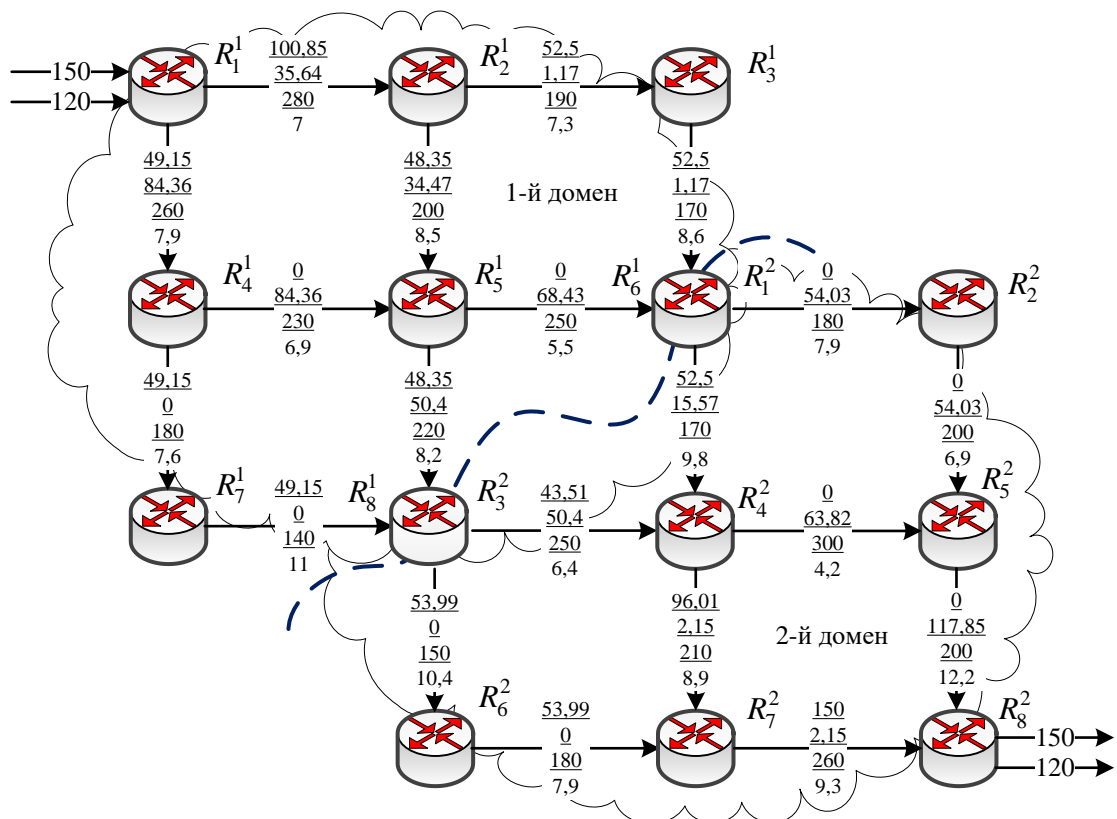


Рис. 5.16. Розв'язання задачі ієрархічно-координаційної міждоменної QoS-маршрутизації з координацією за середньою міжкінцевою затримкою та зв'язністю міждоменних маршрутів

У розривах каналів зв'язку вказано (згори донизу) такі дані: інтенсивність першого потоку пакетів (1/с), інтенсивність другого потоку пакетів (1/с), пропускна здатність каналу зв'язку (1/с), середня затримка пакетів у каналі зв'язку (мс). Середня затримка пакетів першого потоку в першому домені становила 25,39 мс, а в другому – 27,91 мс. Середня затримка пакетів другого потоку в першому домені становила 22,72 мс, а в другому – 25,22 мс. Отже, середня міжкінцева (тобто між маршрутизаторами  $R_1^1$  та  $R_8^2$ ) затримка пакетів першого потоку становила 53,3 мс, а другого потоку – 47,94 мс, що відповідає вимогам, наведеним у табл. 5.5.

Рішення, показане на рис. 5.16, отримано після четвертої ітерації координаційних процедур (5.18), (5.19) та (5.24), (5.25). Зі збільшенням числа приграничних (міждоменних) маршрутизаторів середня кількість подібних ітерацій могла зростати до п'яти. У процесі одношляхової міждоменної маршрутизації, реалізація якої спостерігалася в умовах низької завантаженості ТКМ та/або невисокого рівня QoS-вимог, число координаційних ітерацій зменшувалась до 2÷3. Інші чинники на швидкість збіжності координаційних процедур (5.18), (5.19) та (5.24), (5.25) істотно не впливали, що підтверджує результати, отримані в роботах [72, 79, 81].

### **5.8. Метод ієрархічно-координаційної відмовостійкої маршрутизації в мультидоменних телекомунікаційних мережах із захистом рівня міжкінцевої якості обслуговування**

Результати, отримані в другому розділі та підрозділі 5.6, можуть бути узагальнені на випадок організації ієрархічно-координаційної відмовостійкої маршрутизації в мультидоменних телекомунікаційних мережах із забезпеченням захисту рівня якості обслуговування та представлені у вигляді відповідного математичного методу. Новий метод ієрархічно-координаційної відмовостійкої маршрутизації відрізняється від аналога [342] тим, що

забезпечує захист не тільки структурних елементів мультидоменної мережі (міждоменних маршрутизаторів), але й рівня якості обслуговування за показниками пропускної здатності та середньої міжкінцевої затримки пакетів.

### 5.8.1. Декомпозиційна модель ієрархічно-координаційної відмовостійкої маршрутизації в мультидоменних телекомунікаційних мережах

У межах методу, що пропонується, загалом використовуються позначення, запропоновані в підрозділах 5.1–5.6. Проте тепер маршрутні змінні  $x_{i,j}^{p,k}$ , які є координатами відповідних маршрутних векторів  $\vec{x}$ ,  $\vec{x}_p$  і  $\vec{x}_p^k$ , будуть регламентувати результат розрахунку основних маршрутів у мультидоменній ТКМ. Для побудови множини резервних шляхів необхідно додатково ввести й розрахувати маршрутні змінні  $\bar{x}_{i,j}^{p,k}$ , кожна з яких визначає долю  $k$ -го потоку пакетів, що передаються в  $p$ -му домені ТКМ між маршрутизаторами  $R_i^p$  та  $R_j^p$ , які входять до резервного шляху. За аналогією з (5.6) змінні  $\bar{x}_{i,j}^{p,k}$  можуть бути координатами векторів  $\vec{\bar{x}}$ ,  $\vec{\bar{x}}_p$  і  $\vec{\bar{x}}_p^k$ .

На маршрутні змінні  $\bar{x}_{i,j}^{p,k}$  також накладаються обмеження, представлені умовами реалізація одно/багатошляхової маршрутизації (5.3), умовами збереження потоку (5.4), а також умовами міждоменної взаємодії

$$C_{p,q}^k \bar{x}_p^k = C_{q,p}^k \bar{x}_q^k, \quad p, q = \overline{1, P}, \quad p \neq q, \quad k \in K. \quad (5.26)$$

За аналогією з результатами, отриманими в роботі [342], схема захисту міждоменного (приграничного) маршрутизатора реалізується шляхом захисту множини каналів зв'язку, які йому інцидентні. Позначимо через  $R_{i,*}^p$  множину

маршрутизаторів, що в  $p$ -му домені є суміжними (сусідніми) до маршрутизатора  $R_i^p$ . Нехай необхідно реалізувати захист маршрутизатора, який розділяє  $p$ -й та  $q$ -й домени ТКМ під час передачі пакетів у цьому самому напрямку. Тоді для використання одношляхової маршрутизації в  $p$ -му домені із захистом приграничного маршрутизатора  $R_i^p \in B_{out}^{p,k}$  треба виконати такі умови:

$$\bar{x}_{j,i}^{p,k} \in \{0; \delta_{j,i}^{p,k}\} \quad \forall R_j^p \in R_{i^*}^p, \text{ якщо } R_{i^*}^p \subset R^p \setminus B_{out}^{p,k}, \quad (5.27)$$

де

$$\delta_{j,i}^{p,k} = \begin{cases} 0, & \text{у разі захисту каналу зв'язку } W_{j,i}^p; \\ 1, & \text{в іншому випадку.} \end{cases} \quad (5.28)$$

У випадку реалізації багатошляхової маршрутизації мають виконуватися такі умови:

$$0 \leq \bar{x}_{j,i}^{p,k} \leq \delta_{j,i}^{p,k} \quad \forall R_j^p \in R_{i^*}^p, \text{ якщо } R_{i^*}^p \subset R^p \setminus B_{out}^{p,k}, \quad (5.29)$$

де параметри  $\delta_{j,i}^{p,k}$  приймають значення відповідно до умов (5.28).

Якщо в позначеннях  $q$ -го домену ТКМ маршрутизатор, який захищається, позначається як  $R_i^q \in B_{in}^{q,k}$ , то в процесі одношляхової маршрутизації необхідно забезпечити виконання таких умов:

$$\bar{x}_{i,j}^{q,k} \in \{0; \delta_{i,j}^{q,k}\} \quad \forall R_j^q \in R_{i^*}^q, \text{ якщо } R_{i^*}^q \subset R^q \setminus B_{in}^{q,k}, \quad (5.30)$$

де

$$\delta_{i,j}^{q,k} = \begin{cases} 0, & \text{у разі захисту каналу зв'язку } W_{i,j}^q; \\ 1, & \text{в іншому випадку.} \end{cases} \quad (5.31)$$



Для використання багатошляхової маршрутизації в  $q$ -му домені ТКМ мають виконуватися такі умови:

$$0 \leq \bar{x}_{i,j}^{q,k} \leq \delta_{i,j}^{q,k} \quad \forall R_j^q \in R_{i^*}^q, \text{ якщо } R_{i^*}^q \subset R^q \setminus B_{in}^{q,k}. \quad (5.32)$$

За необхідності захисту (резервування) пропускної здатності каналів ТКМ, а також для попередження перевантаження каналів зв'язку на маршрутні змінні накладаються обмеження [44, 46]:

$$\frac{1}{2} \sum_{k \in K} \lambda^k \left[ x_{i,j}^k + \bar{x}_{i,j}^k + \left| x_{i,j}^k - \bar{x}_{i,j}^k \right| \right] \leq \phi_{i,j}^p, \quad (5.33)$$

які є вдосконаленою версією умов (3.10).

Для забезпечення захисту рівня якості обслуговування за показниками мережної продуктивності – одночасно за пропускною здатністю та середньою міжкінцевою затримкою пакетів уздовж основних маршрутів необхідно виконати QoS-умови (5.9) під час розрахунку середньої затримки пакетів у доменах за формулою (5.12). На маршрутні змінні  $\bar{x}_{i,j}^{p,k}$ , які визначають резервні шляхи, також накладаються QoS-умови

$$\sum_{p=1}^N \bar{\tau}_{MP}^{p,k} \leq \tau_{\langle \text{don} \rangle}^k, \quad (5.34)$$

аналогічні до (5.9), коли для розрахунку середньої затримки пакетів у доменах використовується формула (3.19). У виразі (5.34)  $\bar{\tau}_{MP}^{p,k}$  – це середня затримка пакетів  $k$ -го потоку вздовж резервних шляхів у  $p$ -му домені ТКМ.

### 5.8.2. Розроблення методу ієрархічно-координаційної відмовостійкої маршрутизації в мультидоменних телекомунікаційних мережах із захистом рівня міжкінцевої якості обслуговування

Відповідно до запропонованої вище математичної моделі, основою методу ієрархічно-координаційної відмовостійкої маршрутизації в мультидоменних ТКМ, що пропонується, є розв'язання оптимізаційної задачі на підставі розрахунку векторів маршрутних змінних  $\vec{x}_p^k$  та  $\bar{\vec{x}}_p^k$  ( $p = \overline{1, P}$ ,  $k \in K$ ) з урахуванням обмежень (5.3), (5.5), (5.14), (5.27)–(5.33) у процесі використання критерію оптимальності:

$$\min_{x, \bar{x}} F, \quad F = \sum_{p=1}^P \sum_{k \in K} \left[ (\vec{x}_p^k)^t H_p^k \vec{x}_p^k + (\bar{\vec{x}}_p^k)^t H_p^k \bar{\vec{x}}_p^k \right]. \quad (5.35)$$

Цільова функція  $F$  характеризує повну умовну вартість організації ієрархічної міждоменної швидкої перемаршрутизації в ТКМ. Перший доданок під сумою в правій частині виразу (5.35) визначає умовну вартість використання основних маршрутів у доменах ТКМ, а другий доданок – резервних шляхів.

Розвиваючи підхід, висвітлений у підрозділі 5.6 та оснований на використанні принципу цільової координації [335], для розрахунку додатково й множини резервних шляхів лагранжіан (5.16) змінює свою форму та зміст:

$$L = \sum_{p=1}^N \sum_{k \in K} (\vec{x}_p^k)^t H_p^k \vec{x}_p^k + \sum_{p=1}^N \sum_{q=1}^N \sum_{\substack{k \in K \\ q \neq p}} (\bar{\mu}_{p,q}^k)^t (C_{p,q}^k \bar{\vec{x}}_p^k - C_{q,p}^k \bar{\vec{x}}_q^k) + \sum_{k \in K} f^k \left( \sum_{p=1}^N \bar{\tau}_{MP}^{p,k} - \bar{\tau}_{\langle don \rangle}^k \right) + \sum_{p=1}^N \sum_{q=1}^N \sum_{\substack{k \in K \\ q \neq p}} (\bar{\mu}_{p,q}^k)^t (C_{p,q}^k \bar{\vec{x}}_p^k - C_{q,p}^k \bar{\vec{x}}_q^k) + \sum_{k \in K} \bar{f}^k \left( \sum_{p=1}^N \bar{\tau}_{MP}^{p,k} - \bar{\tau}_{\langle don \rangle}^k \right), \quad (5.36)$$

де  $\bar{\mu}_{p,q}^k$  – множники Лагранжа, віднесені до кожної з умов взаємодії доменів (5.26) у процесі визначення резервних шляхів;

$\bar{f}^k$  – множники Лагранжа, віднесені до кожної з QoS-умов (5.34), які мають виконуватися вздовж резервних маршрутів.

Тоді за умови  $L = \sum_{p=1}^N L_p$  кожен з лагранжіанів доменів (5.23) дещо

змінить свій запис:

$$L_p = \sum_{k \in K} (\bar{x}_p^k)^t H_p^k \bar{x}_p^k + \sum_{\substack{q=1 \\ p \neq q}}^N \sum_{k \in K_p^+} (\bar{\mu}_{p,q}^k)^t C_{p,q}^k \bar{x}_p^k - \sum_{\substack{q=1 \\ p \neq q}}^N \sum_{k \in K_p^-} (\bar{\mu}_{q,p}^k)^t C_{p,q}^k \bar{x}_p^k + \sum_{k \in K} f^k \tau_{MP}^{p,k} + \\ + \sum_{\substack{q=1 \\ p \neq q}}^N \sum_{k \in K_p^+} (\bar{\mu}_{p,q}^k)^t C_{p,q}^k \bar{x}_p^k - \sum_{\substack{q=1 \\ p \neq q}}^N \sum_{k \in K_p^-} (\bar{\mu}_{q,p}^k)^t C_{p,q}^k \bar{x}_p^k + \sum_{k \in K} \bar{f}^k \bar{\tau}_{MP}^{p,k}. \quad (5.37)$$

Відповідно до доповнень моделі (5.26)–(5.34) та зміни критерію оптимальності (5.35)–(5.37), задачі ієрархічних рівнів методу міждоменної відмовостійкої QoS-маршрутизації в програмно-конфігурованій ТКМ тепер будуть мати таке формулювання. Перший (нижній) ієрархічний рівень маршрутизації, який охоплює SDN-контролери доменів, відповідає за визначення основних та резервних шляхів на підставі розрахунку маршрутних змінних, представлених векторами  $\bar{x}_p^k$  та  $\bar{x}_p^k$  ( $p = \overline{1, N}$ ,  $k \in K$ ), у процесі мінімізації лагранжіанів (5.37). На маршрутні змінні накладаються обмеження вигляду (5.3), (5.5), (5.14) та (5.27)–(5.33). Результати розрахунків передаються на верхній рівень – на SDN-контролер програмно-конфігурованої мережі взагалі.

На верхньому рівні SDN-контролер мережі здійснює координацію рішень, які надходять із нижнього рівня, тобто з SDN-контролерів доменів, для забезпечення зв'язності основних та резервних шляхів (5.7), (5.26) та виконання QoS-умов (5.9) і (5.34). Координація в напрямку розрахунку основних маршрутів

реалізується шляхом виконання градієнтних процедур (5.18), (5.19) та (5.24), (5.25). Для координації рішень щодо розрахунку резервних шляхів вводяться подібні до (5.18), (5.19) і (5.24), (5.25) градієнтні процедури для модифікації відповідних векторів множників Лагранжа:

$$\bar{\mu}_{p,q}^k(a+1) = \bar{\mu}_{p,q}^k(a) + \nabla \bar{\mu}_{p,q}^k, \quad (5.38)$$

де

$$\nabla \bar{\mu}_{p,q}^k(\bar{x}) \Big|_{\bar{x} = \bar{x}^*} = C_{p,q} \bar{x}_p^k - C_{q,p} \bar{x}_q^k; \quad (5.39)$$

а також

$$\bar{f}^k(a+1) = \bar{f}^k(a) + \nabla \bar{f}^k, \quad (5.40)$$

де

$$\nabla \bar{f}^k(\bar{x}) \Big|_{\bar{x} = \bar{x}^*} = \sum_{p=1}^N \bar{\tau}_{MP}^{p,k} - \tau_{\langle \text{don} \rangle}^k. \quad (5.41)$$

Оновлені значення векторів множників Лагранжа  $\bar{\mu}_{p,q}^k$ ,  $\bar{\mu}_{p,q}^k$  і  $\bar{f}$ ,  $\bar{f}$  передаються на SDN-контролери доменів (на нижній рівень) для визначення нових основних та резервних шляхів на підставі розрахунку маршрутних векторів  $\bar{x}_p^k$  та  $\bar{x}_p^k$ . У межах методу розрахунок векторів  $\bar{x}_p^k$  і  $\bar{x}_p^k$  знову набуває ітераційного характеру. Зв'язність міждоменних основних та резервних маршрутів із виконанням QoS-умов (5.9) та (5.34) буде забезпечуватися після завершення роботи описаних градієнтних процедур, коли

$$\nabla \bar{\mu}_{p,q}^k(x) = 0, \nabla \bar{\mu}_{p,q}^k(\bar{x}) = 0 \quad \text{і} \quad \nabla f^k(x) \leq 0, \nabla \bar{f}^k(\bar{x}) \leq 0.$$

Отже, виконання QoS-умов (5.9) та (5.34) уздовж як основних, так і резервних шляхів, гарантує захист рівня якості обслуговування за показниками

пропускної здатності та середньої міжкінцевої затримки пакетів у мультидоменній ТКМ. Як і в інших методах, описаних у підрозділах 5.4 та 5.6, ефективність рішень щодо ієрархічно-координаційної відмовостійкої QoS-маршрутизації залежить від швидкості збіжності координаційних процедур (5.18), (5.19), (5.24), (5.25), (5.38)–(5.41). Мінімізація числа ітерацій у визначенні шуканого оптимального маршрутного рішення сприятиме, по-перше, зменшенню обсягу службового трафіка, який циркулює між SDN-контролерами різних ієрархічних рівнів управління; по-друге, скороченню часу розв’язання задачі маршрутизації в мультидоменній ТКМ загалом.

### **5.8.3. Дослідження методу ієрархічно-координаційної відмовостійкої маршрутизації в мультидоменних телекомунікаційних мережах із захистом рівня міжкінцевої якості обслуговування**

Працездатність запропонованого методу ієрархічно-координаційної відмовостійкої маршрутизації в мультидоменних телекомунікаційних мережах із захистом рівня міжкінцевої якості обслуговування буде продемонстрована на розрахунковому прикладі, вихідні дані якого наведені на рис. 5.15 та в табл. 5.5. Нехай під час швидкої перемаршрутизації необхідно захистити приграничний (міждоменний) маршрутизатор  $R_6^1$  ( $R_1^2$ ). Тоді на рис. 5.16 представлено розв’язання задачі ієрархічно-координаційної відмовостійкої QoS-маршрутизації, а саме показано множину основних маршрутів для двох потоків. Тоді на рис. 5.17 наведено множину резервних шляхів для тих самих двох потоків пакетів (табл. 5.5) у процесі забезпечення захисту приграничного маршрутизатора. Отримані рішення координовані як за середньою міжкінцевою затримкою, так і за зв’язністю міждоменних маршрутів у мультидоменній ТКМ.

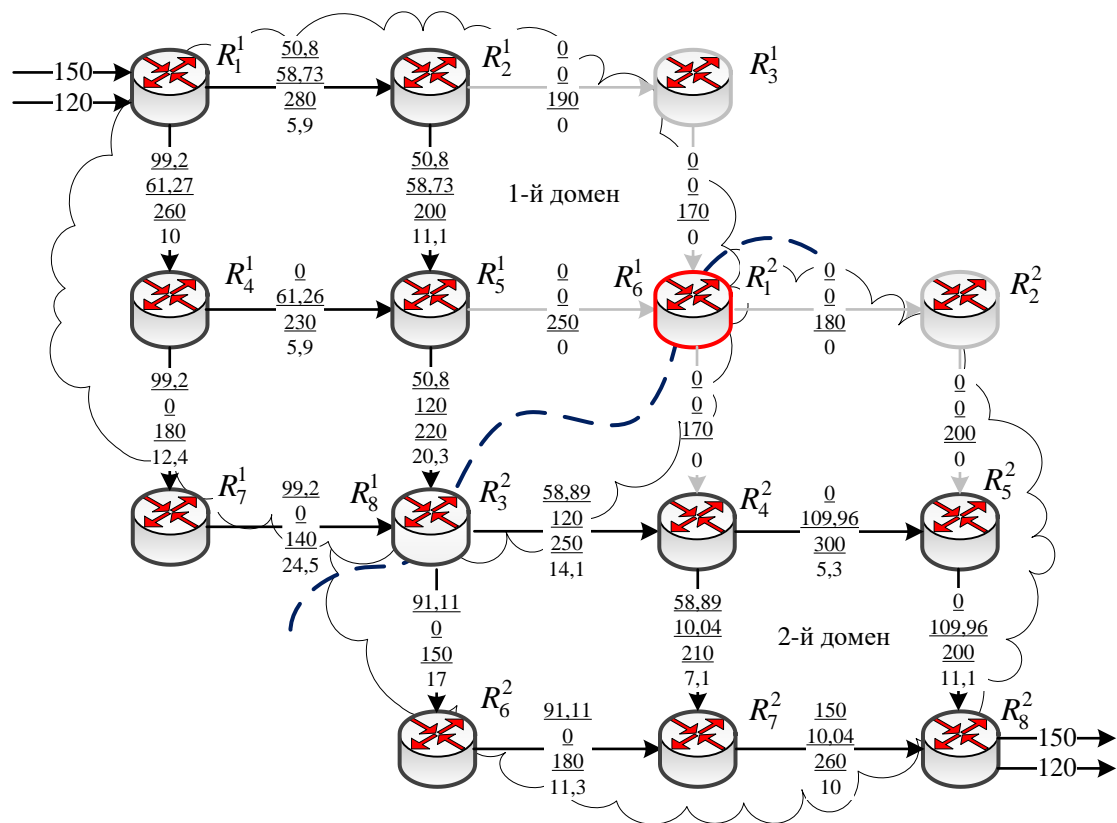


Рис. 5.17. Розв'язання задачі ієрархічно-координаційної міждоменної QoS-маршрутизації з координацією за середньою міжкінцевою затримкою та зв'язністю міждоменних маршрутів (множина резервних шляхів)

Як і на рис. 5.16, на рис. 5.17 у розривах каналів зв'язку вказано (згори донизу) такі дані: інтенсивність першого потоку пакетів (1/с), інтенсивність другого потоку пакетів (1/с), пропускна здатність каналу зв'язку (1/с), середня затримка пакетів у каналі зв'язку (мс).

Уздовж резервних шляхів середня затримка пакетів першого потоку в першому домені становила 44,73 мс, а в другому – 36,53 мс. Середня затримка пакетів другого потоку в першому домені становила 37,83 мс, а в другому – 31,57 мс. Отже, середня міжкінцева (тобто між маршрутизаторами  $R_1^1$  і  $R_8^2$ ) затримка пакетів першого потоку становила 81,26 мс, а другого потоку – 69,4 мс. Це свідчить про те, що під час реалізації ієрархічно-координаційної відмовостійкої маршрутизації в мультидоменній ТКМ забезпечувався захист приграничного маршрутизатора  $R_6^1$  ( $R_1^2$ ) та рівня якості обслуговування за

показниками пропускної здатності та середньої міжкінцевої затримки пакетів, оскільки QoS-вимоги, наведені в табл. 5.5, виконувались як уздовж множини основних маршрутів (рис. 5.16), так і вздовж резервних шляхів (рис. 5.17).

Рішення, яке показано на рис. 5.16 та 5.17, отримано після п'ятої ітерації координаційних процедур (5.18), (5.19), (5.24), (5.25), (5.38)–(5.41). Зі збільшенням числа приграничних (міждоменних) маршрутизаторів середня кількість подібних ітерацій могла зрости до шести-семи. За умови реалізації одношляхової міждоменної маршрутизації число координаційних ітерацій зменшувалась до  $2 \div 3$ . Інші чинники на швидкість збіжності координаційних процедур (5.18), (5.19), (5.24), (5.25), (5.38)–(5.41) істотно не впливали.

## 5.9. Висновки до п'ятого розділу

1. Подальший розвиток отримала декомпозиційна модель міждоменної маршрутизації (5.1)–(5.14) із забезпеченням якості обслуговування в телекомунікаційній мережі, яка складається з множини послідовно з'єднаних доменів. Основу моделі становили умови реалізації одно- та багатошляхової (5.3) маршрутизації, умови збереження потоку (5.4), запобігання перевантаження каналів зв'язку та ІКМ загалом (5.5), а також умови міждоменної взаємодії (5.7), виконання яких гарантувало зв'язність міждоменних маршрутів. Потокова модель міждоменної маршрутизації була доповнена умовами забезпечення міжкінцевої та нормованої якості обслуговування (5.8)–(5.13). Новизною запропонованої моделі маршрутизації є модифікація умов збереження потоку (5.14), що дозволило сформулювати умови забезпечення міжкінцевої якості обслуговування в мультидоменних телекомунікаційних мережах за показниками пропускної здатності та середньої міжкінцевої затримки пакетів (5.12), (5.13). Сформулювати в аналітичному вигляді умови забезпечення якості обслуговування (5.12), (5.13) вдалося на підставі тензорного моделювання ТКМ у геометричному просторі, який

створювався координатними шляхами – гілками (каналами), міжполюсними маршрутами та внутрішніми вузловими парами.

2. Запропоновано метод ієрархічно-координаційної маршрутизації в мультидоменних телекомунікаційних мережах (5.15)–(5.19) із забезпеченням нормованої якості обслуговування, який є подальшим розвитком рішень, представлених у роботах [55, 56, 340–342]. Отримані з його допомогою маршрутні рішення спрямовані на підвищення масштабованості ТКМ. Новизною методу є забезпечення нормованої за доменами середньої міжкінцевої затримки пакетів, коли виконання нормованих вимог щодо якості обслуговування забезпечується в кожному домені окремо (5.11), а координація маршрутних рішень здійснюється за умовами міждоменної взаємодії (5.7).

3. У межах запропонованого методу (рис. 5.4) задачу міждоменної QoS-маршрутизації вдалося представити в оптимізаційній формі з квадратичним критерієм оптимальності (5.15). Для розв'язання поставленої оптимізаційної задачі використано принцип цільової координації з теорії ієрархічних багаторівневих систем управління [335]. Це дозволило коректно сформулювати та забезпечити розв'язання задач, які покладені на два ієрархічні рівні. Нижній рівень (рівень SDN-контролерів доменів) відповідав за розрахунок внутрішньодоменних маршрутів на підставі мінімізації виразу (5.17) відповідно до обмежень (5.3), (5.4) або (5.14), (5.5) та (5.10)–(5.13). Верхній рівень (рівень SDN-контролера мережі) відповідав за координацію рішень нижнього рівня шляхом виконання умов міждоменної взаємодії (5.7) для забезпечення зв'язності міждоменних маршрутів у межах градієнтної процедури (5.18), (5.19). Координація маршрутних рішень завершувалася в разі наближення градієнта (5.19) до нуля.

4. Під час дослідження запропонованого методу міждоменної QoS-маршрутизації на низці розрахункових прикладів підтверджена його працездатність та ефективність з точки зору забезпечення нормованої якості обслуговування. Експериментально встановлено, що метод сходився до оптимального рішення за кінцеву кількість ітерацій (5.18), (5.19). Для структури



мережі, що була обрана як тестова (рис. 5.2), кількість ітерацій координаційної процедури (5.18), (5.19) за умови відповідного налаштування градієнтного пошуку не перевищувала трьох. Зменшення кількості подібних ітерацій сприяє зниженню обсягів службового трафіка, який передається в мережі між маршрутизаторами та SDN-контролерами різних рівнів, а також мінімізації загального часу розв'язання задачі міждоменної QoS-маршрутизації.

5. У розділі запропоновано метод ієрархічно-координаційної маршрутизації в мультидоменних телекомунікаційних мережах (5.15)–(5.19) із забезпеченням міжкінцевої якості обслуговування. У межах цього методу норми на QoS-показники, які повинен забезпечувати кожен окремий домен, не встановлювалися статично, наприклад, на SDN-контролері ТКМ, а можуть за необхідності динамічно перерозподілятися між доменами з виконанням умов (5.9) відповідно до їхньої структури, пропускнуої здатності та завантаженості.

6. В основу методу покладено розв'язання оптимізаційної задачі з мінімізації цільової функції (5.15) за допомогою принципу цільової координації. Новизна цього методу полягає в тому, що координація маршрутних рішень здійснюється як за умовами міждоменної взаємодії (5.7), так і за умовами забезпечення наскрізної середньої затримки пакетів у ТКМ загалом (5.9), (5.12). На відміну від попереднього методу, задача забезпечення міжкінцевої якості обслуговування розв'язується не на рівні доменів (SDN-контролерів доменів), а на рівні SDN-контролера ТКМ загалом шляхом виконання градієнтної координаційної процедури (5.24), (5.25). Це дозволяє підвищити гнучкість рішень щодо міждоменної маршрутизації та забезпечити якість обслуговування, особливо в умовах, коли встановлення QoS-норм для доменів є складним завданням.

7. Отримав подальший розвиток метод ієрархічно-координаційної відмовостійкої маршрутизації в мультидоменних телекомунікаційних мережах. Новизною методу є забезпечення захисту рівня якості обслуговування в мультидоменних телекомунікаційних мережах за показниками пропускнуої здатності та середньої міжкінцевої затримки пакетів під час резервування

(захисту) міждоменних маршрутизаторів у ході розрахунку основних і резервних шляхів, що дозволило підвищити масштабованість та відмовостійкість маршрутних рішень.

8. В основу запропонованого методу ієрархічно-координаційної відмовостійкої маршрутизації в мультидоменних телекомунікаційних мережах також покладено принцип цільової координації. Метод оснований на одночасному розрахунку основних та резервних міждоменних шляхів, уздовж яких для кожного потоку пакетів виконуються QoS-вимоги щодо пропускної здатності та середньої міжкінцевої затримки. Дослідження методу підтвердило його працездатність та збіжність координаційних процедур за обмежену кількість ітерацій (у середньому до п'яти). Показано, що на збіжність координаційних процедур (5.18), (5.19), (5.24), (5.25), (5.38)–(5.41) впливала завантаженість мережі, реалізація стратегій одно- або багатозляхової маршрутизації та кількість приграничних (міждоменних) маршрутизаторів.

## РОЗДІЛ 6

### ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАПРОПОНОВАНИХ МАРШРУТНИХ РІШЕНЬ ТА РОЗРОБЛЕННЯ НАУКОВО-МЕТОДИЧНИХ РЕКОМЕНДАЦІЙ ЩОДО ЇХНЬОЇ ПРАКТИЧНОЇ РЕАЛІЗАЦІЇ

**6.1. Особливості експериментального дослідження тензорних моделей маршрутизації та швидкої перемаршрутизації із забезпеченням якості обслуговування в телекомунікаційних мережах за допомогою Network Simulator 3**

**6.1.1. Обґрунтування вибору засобів експериментального дослідження процесів маршрутизації в телекомунікаційних мережах**

Одним із найбільш важливих етапів розроблення моделей і методів відмовостійкої маршрутизації чутливого до затримок і втрат трафіка в напрямку забезпечення захисту рівня якості обслуговування є їхнє експериментальне дослідження. Основною метою реалізації цього етапу є, по-перше, перевірка адекватності розроблених моделей і методів та перевірка достовірності отриманих результатів, по-друге, оцінка ефективності функціонування ТКМ на основі використання розроблених моделей та методів відмовостійкої маршрутизації, по-третє, розроблення рекомендацій щодо їхнього практичного застосування в сучасних та перспективних ТКМ.

Варто відзначити, що найбільш достовірні результати дослідження можуть бути отримані внаслідок проведення натурного експерименту на сучасному мережному обладнанні постійно діючої ТКМ, у якій протікає реальний трафік. Проте проведення натурного експерименту на діючій ТКМ є досить складним організаційним та технічним завданням. Одна з причин цього полягає у високій вартості експлуатації мережного обладнання для проведення повного та тривалого наукового дослідження. Тому на практиці науковці широко використовують або лабораторні макети різного класу мереж, або ж програмні симулятори [343–349],

які дозволяють виконувати імітаційне моделювання ТКМ з точки зору дослідження цільових мережних процесів, зокрема процесів маршрутизації та оцінки рівня якості обслуговування за показниками NP та QoE.

У дисертаційній роботі для вирішення поставлених завдань щодо дослідження запропонованих моделей та методів відмовостійкої маршрутизації чутливого до затримок і втрат трафіка в напрямку забезпечення захисту рівня якості обслуговування ТКМ були задіяні засоби як аналітичного, так і імітаційного моделювання. До того ж інструменти аналітичного моделювання, представлені тулбоксами пакета MATLAB [328, 329], активно використовувалися для отримання рішень, сформульованих у попередніх розділах роботи. У цьому розділі основну увагу приділено дослідженню розроблених моделей та методів відмовостійкої маршрутизації за допомогою найбільш поширених пакетів імітаційного моделювання (мережних симуляторів).

На сьогоднішній день відомо досить багато мережних симуляторів, до найпоширеніших з яких належать UnitLab, Boson NetSim, OPNET, OMNET ++, Network Simulator 3 (NS3), VIRL, EVE-NG, IxChariot тощо. Крім того, існують вузькоспеціалізовані симулятори, створені лише для моделювання певного обладнання або конкретних мережних процесів, наприклад, комутації, маршрутизації, обслуговування черг. Як правило, подібне програмне забезпечення випускається виробниками телекомунікаційного обладнання, зокрема для навчання майбутніх фахівців. Це стосується, наприклад, симуляторів Packet Tracer, створеного компанією Cisco, та GNS3.

Одними з найбільш потужних та поширених мережних симуляторів для імітаційного моделювання телекомунікаційних мереж є Network Simulator 3 та IxChariot. Однією з переваг NS3 є розроблення Framework під назвою FlowMonitor, який реалізує досить гнучкі методи збору та аналізу різноманітної статистики щодо стану мережних вузлів та каналів зв'язку, а також значень таких показників продуктивності мережі, як пропускна здатність, середня затримка, імовірність втрат пакетів, джитер тощо. NS3 є дуже ефективним засобом моделювання за рахунок використання C++ як вбудованої мови опису моделей. Так само, крім C++,

може застосовуватися мова програмування Python. Обидві мови в симуляторі рівноправні та приймаються для опису моделей телекомунікаційних мереж і систем. Загалом симулятор «за замовчуванням» не має власного графічного інтерфейсу, проте використання таких додаткових засобів, як NetAnimator та PyViz дозволяє здійснювати спостереження за роботою певного протоколу маршрутизації або створювати власні налаштування для передачі трафіка, відповідно до отриманих у другому та третьому розділах цієї дисертаційної роботи математичних моделей та методів маршрутизації.

Для дослідження моделей відмовостійкої маршрутизації із захистом рівня якості обслуговування, що сприймається кінцевим користувачем, розроблених у четвертому розділі, використовувався симулятор IxChariot. Такий вибір обумовлений наявністю вбудованих засобів навантажувального тестування із підтримкою налаштування та моніторингу великої кількості параметрів мультимедійного трафіка. Симулятор IxChariot складається з сервера IxChariot Server та програмних кінцевих точок (серверів, кінцевих користувачів тощо). Кінцеві точки генерують тестовий трафік заданих протоколів або додатків та вимірюють такі важливі характеристики, як пропускна здатність, затримка, втрати пакетів. Зазначений пакет підтримує такі протоколи як TCP, UDP, RTP, IPv4, IPv6, IP Multicast, VoIP (G.711, G.723, G.726, G.729) [176–183].

Крім того, симулятор IxChariot порівняно з іншими симуляторами дозволяє імітувати виклики VoIP із можливістю створення двонаправлених потоків голосового трафіка з різними типами кодеків (G.711, G.729, AMR тощо) та оцінкою якості передачі голосу та мультимедійного потоку трафіка, який характеризується показниками MOS: R-фактора та мультимедійної якості. Отже, використання пакета IxChariot дозволяє оцінювати вплив затримки пакетів, їхніх втрат і варіації затримки на якість голосового зв'язку та мультимедійного контенту. Цей функціонал найбільш повно відповідає меті дослідження результатів, отриманих у четвертому розділі дисертаційної роботи, які полягають у забезпеченні QoE за показниками R-фактора та мультимедійної якості в умовах реалізації відмовостійкої маршрутизації.

### 6.1.2. Опис базової імітаційної моделі з використанням NS3

Для проведення досліджень розроблених тензорних моделей маршрутизації із забезпеченням якості обслуговування в телекомунікаційних мережах за допомогою симулятора NS3 [348] використано базову імітаційну модель, структура якої представлена на рис. 6.1.

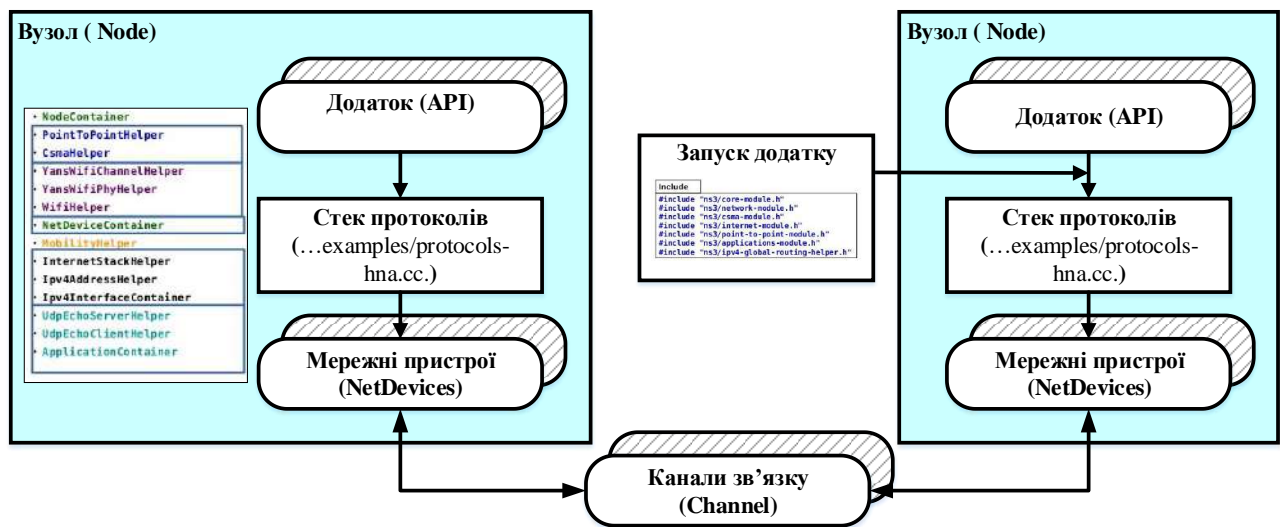


Рис. 6.1. Структура імітаційної моделі для симуляції роботи телекомунікаційної мережі за допомогою NS3

У процесі моделювання ТКМ відповідно до базової моделі (рис. 6.1) параметри передачі пакетів та вимоги до якості обслуговування задаються та контролюються на рівні додатку (API), процеси маршрутизації описуються в блоці «Стек протоколів», а в блоках «Мережні пристрої» та «Канали зв'язку» задаються структурні та функціональні характеристики ТКМ, її вузлів та каналів зв'язку. Загалом, завдяки гнучкому API, надається можливість побудови як власних моделей будь-якої складності, так і завдяки використаній ліцензії GNU GPLv2, зміни та доповнення вже наявних моделей, що містяться в комплекті NS3. Отже, можна зазначити, що базова імітаційна модель за своєю структурою та функціями відповідає вимогам дослідження і має такі можливості, як:

- створення топології мережі (встановлення кількості вузлів та каналів);

- призначення IP-адреси кожному мережному вузлу та пропускної здатності каналам зв'язку;
- використання протоколів мережного рівня (IPv4 і IPv6) та транспортного рівня (TCP, UDP, ICMP);
- генерація трафіка між зазначеними вузлами в мережі із заданою інтенсивністю;
- використання аналізатора трафіка, зокрема для аналізу обраних показників QoS/NP/QoE.

Так, за допомогою симулятора NS3 дослідження телекомунікаційних мереж відбувається за трьома етапами (рис. 6.2):

- *перший етап*: створення структури ТКМ, що має на увазі опис вузлів та каналів зв'язку;
- *другий етап*: конфігурація створеної структури ТКМ;
- *третій етап*: генерація потоків трафіка та аналіз результатів дослідження.

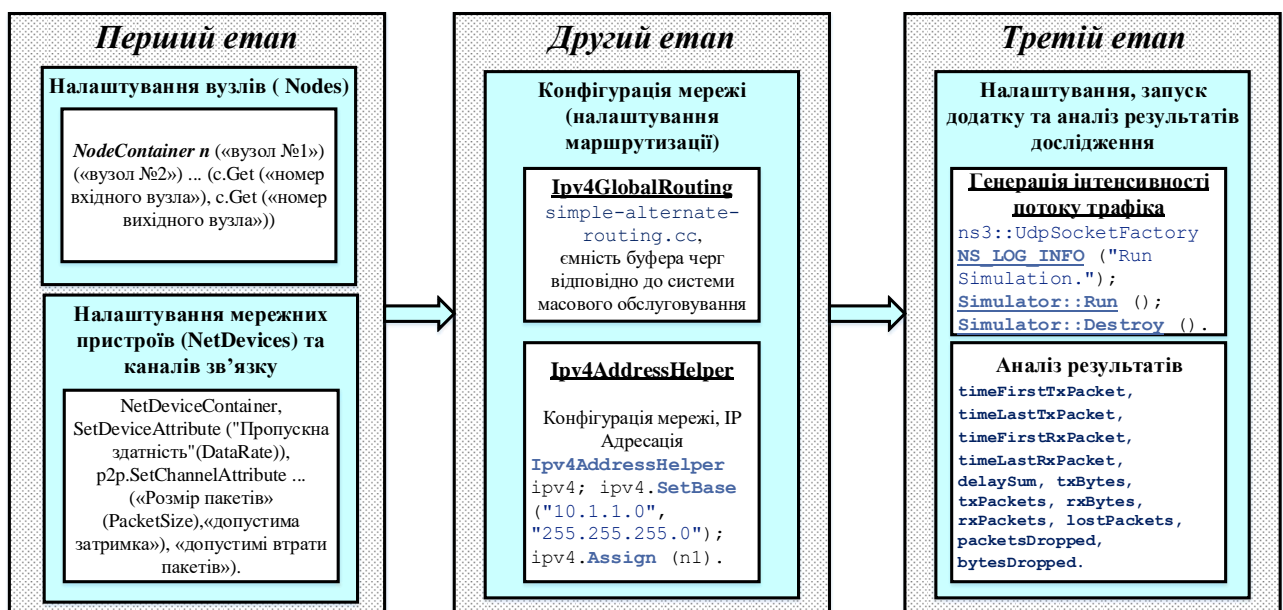


Рис. 6.2. Етапи проведення експериментального дослідження ТКМ

Блок підключення NodeContainer на рис. 6.3 демонструє функції, за допомогою яких створюються та з'єднуються вузли (маршрутизатори) один з одним. Кількість вузлів задається параметром функції *c.Create* та в розглянутому прикладі (рис. 6.3) дорівнює шести маршрутизаторам. З'єднання вузлів задається

шляхом установлення каналів між конкретними двома вузлами: *NodeContainer* *n* («вузол № 1») («вузол № 2») ... (*c.Get* («номер вхідного вузла»), *c.Get* («номер вихідного вузла»)); якщо для будь-якого з вузлів не буде вказано відповідного з'єднання, то він просто не братиме участі в моделюванні мережі, що дозволяє досліджувати процеси відмовостійкої маршрутизації в умовах відмови вузлів та відповідних каналів зв'язку ТКМ.

```
NodeContainer c;
c.Create (6);
NodeContainer n02 = NodeContainer (c.Get (0), c.Get (2));
NodeContainer n12 = NodeContainer (c.Get (1), c.Get (2));
NodeContainer n32 = NodeContainer (c.Get (3), c.Get (2));
NodeContainer n34 = NodeContainer (c.Get (3), c.Get (4));
NodeContainer n54 = NodeContainer (c.Get (5), c.Get (4));
```

Рис. 6.3. Приклад налаштування вузлів у ТКМ

Приклад налаштування розміру пакетів (*PacketSize*), що передаються, та швидкості їхньої передачі (*DataRate*) наведено на рис. 6.4.

```
Config::SetDefault ("ns3::OnOffApplication::PacketSize",
UIntegerValue (210));
Config::SetDefault ("ns3::OnOffApplication::DataRate",
StringValue ("448kb/s"));
```

Рис. 6.4. Процес налаштування розміру пакетів та швидкості їхньої передачі в ТКМ

Зазначені параметри (рис. 6.3 та 6.4), суттєво впливаючи на продуктивність мережі загалом, як правило, використовуються в імітаційному моделюванні як вихідні дані.

На рис. 6.5 представлено приклад налаштування каналів зв'язку. Так, процес створення каналів зв'язку між вузлами, установлення швидкості передачі даних задається за допомогою атрибутів *p2p.SetDeviceAttribute* ... («пропускна здатність каналів зв'язку»). Варто зазначити, що у випадку захисту будь-якого каналу зв'язку достатньо буде встановити нульове значення щодо



пропускної здатності того чи іншого каналу зв'язку, щоб цей канал не використовувався під час передачі трафіка, що також свідчить про можливість дослідження процесів відмовостійкої маршрутизації.

```
PointToPointHelper p2p;
p2p.SetDeviceAttribute ("DataRate", StringValue ("5Mbps"));
```

Рис. 6.5. Приклад налаштування каналів зв'язку в ТКМ

Обмеження щодо затримки передачі пакетів даних задаються за допомогою `p2p.SetChannelAttribute ...` («затримка») (рис 6.6).

```
p2p.SetChannelAttribute ("Delay", StringValue ("2ms"));
NetDeviceContainer nd02 = p2p.Install (n02);
NetDeviceContainer nd12 = p2p.Install (n12);
p2p.SetDeviceAttribute ("DataRate", StringValue ("1500kbps"));
p2p.SetChannelAttribute ("Delay", StringValue ("10ms"));
NetDeviceContainer nd32 = p2p.Install (n32);
NetDeviceContainer nd34 = p2p.Install (n34);
NetDeviceContainer nd54 = p2p.Install (n54);
```

Рис. 6.6. Приклад установлення рекомендованих значень затримок у ТКМ

Для встановлення обмежень щодо ймовірності втрат пакетів використовується блок `PacketLossCounter` (рис. 6.7).

```
PacketLossCounter::PacketLossCounter (uint8_t bitmapSize)
m_lost (0),
m_bitMapSize (0),
m_lastMaxSeqNum (0),
m_receiveBitMap (0)
```

Рис. 6.7. Приклад установлення рекомендованих значень рівня втрат пакетів

Варто зазначити, що наведені вище приклади налаштування відповідають застосуванню симулятора NS3 без графічного інтерфейсу із використанням мови програмування C++. Також для зручності та наочності запропоновано використовувати графічний додаток `FlowMonitor`, за допомогою атрибутів якого

можна задавати всі структурно-функціональні характеристики мережі в одному блоці, який зображено на рис. 6.8.

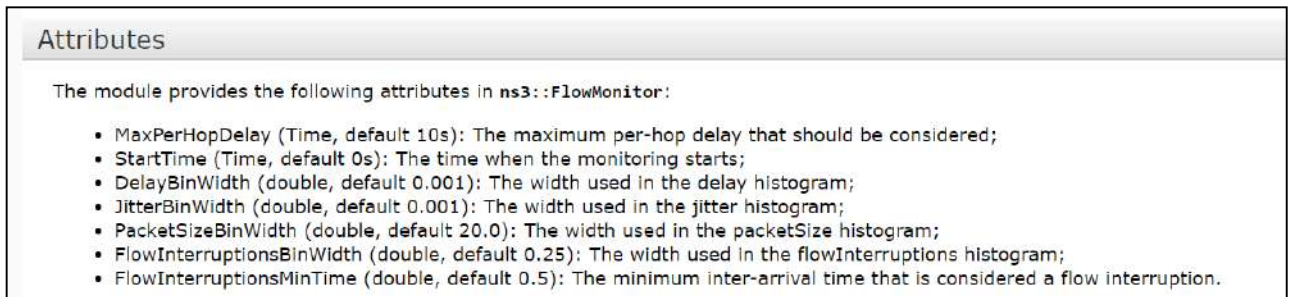


Рис. 6.8. Структурно-функціональне налаштування ТКМ за допомогою FlowMonitor

Після опису мережних елементів на наступному (*другому*) етапі проведення дослідження проводяться налаштування IP адресації та процесу маршрутизації. Симулятор NS3 дає можливість створити власний алгоритм маршрутизації. Це дозволяє дослідити отримані в дисертаційній роботі результати маршрутизації та швидкої перемаршрутизації.

На *третьому* етапі для проведення дослідження процесів маршрутизації та швидкої перемаршрутизації із забезпеченням якості обслуговування в телекомунікаційних мережах за допомогою NS3 достатньо обрати структуру ТКМ та задати відповідні вихідні дані.

Результатами дослідження змодельованої ТКМ після запуску NS3 будуть такі функції:

- timeFirstTxPacket: коли був переданий перший пакет у потоці;
- timeLastTxPacket: коли було передано останній пакет у потоці;
- timeFirstRxPacket: коли перший пакет у потоці дістався вузла-отримувача;
- timeLastRxPacket: коли було отримано останній пакет у потоці;
- delaySum: сума міжкінцевих затримок для всіх отриманих пакетів потоку;
- jitterSum: сума всіх наскрізних значень джитеру (варіація затримки) для всіх прийнятих пакетів потоку, як визначено у RFC 3393 [350];
- txBytes, txPackets: загальна кількість переданих байтів/пакетів потоку;

- rxBytes, rxPackets: загальна кількість отриманих байтів/пакетів потоку;
- lostPackets: загальна кількість пакетів, які передбачається втратити;
- timesForwarded: кількість переадресацій пакета;
- delayHistogram, packetSizeHistogram: версії гістограм для розміру затримки та довжини пакета відповідно;
- packetsDropped, bytesDropped: кількість втрачених пакетів і байтів.

Отже, завдяки отриманим кількісним результатам моделювання заданої структури ТКМ із відповідними вихідними даними за допомогою NS3 можна оцінити ефективність запропонованих моделей маршрутизації та перемаршрутизації та порівняти їх з результатами аналітичних розрахунків, наведеними в третьому розділі дисертаційної роботи.

### **6.1.3. Дослідження тензорної моделі швидкої перемаршрутизації із захистом рівня якості обслуговування за показниками мережної продуктивності в ТКМ, представленій в базисі контурів та вузлових пар, за допомогою Network Simulator 3**

Для проведення дослідження тензорної моделі швидкої перемаршрутизації із забезпеченням якості обслуговування в ТКМ, представленій в базисі контурів та вузлових пар (2.38), (2.39), (2.64), (2.71), (2.72), (3.1)–(3.18), за допомогою NS3 був обраний фрагмент мережі, зображений на рис. 3.5. Такий вибір обумовлений зручністю подальшого порівняння результатів імітаційного моделювання, отриманого в середовищі MATLAB, та результатів, отриманих у межах імітаційної моделі ТКМ, створеної за допомогою NS3.

Так, за допомогою симулятора NS3 під час розрахунку основного мультишляху обрано фрагмент мережі, який складався з 16 маршрутизаторів і 24 каналів зв'язку та представлений на рис. 6.9.

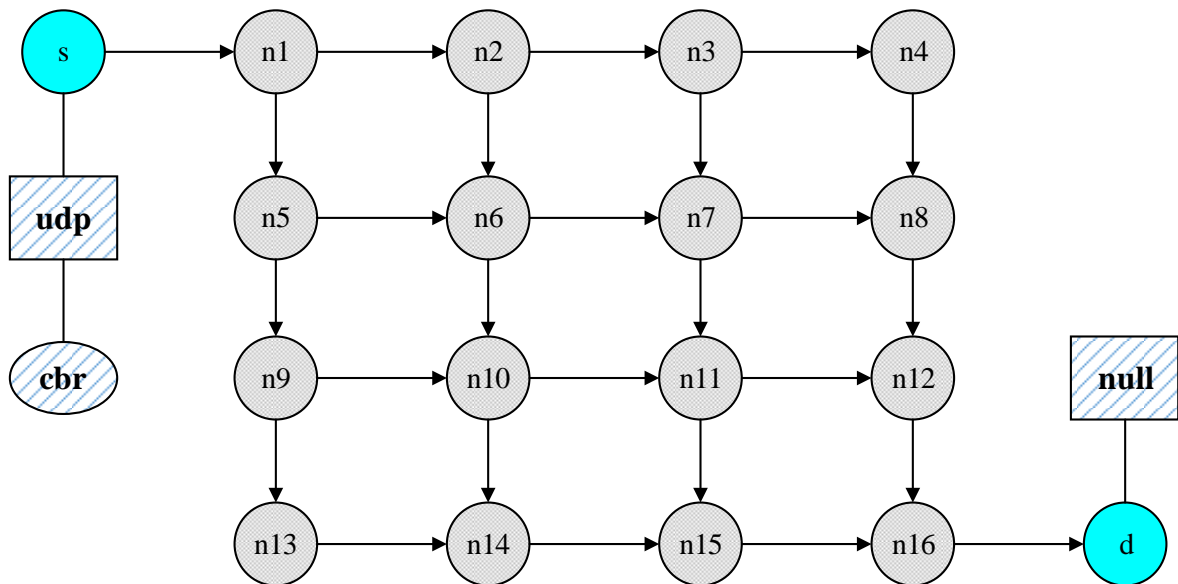


Рис. 6.9. Фрагмент ТКМ, який досліджувався за допомогою симулятора NS3, для аналізу основного мультишляху



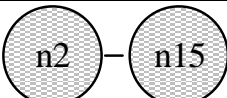

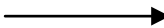

Так, на рис. 6.9 для побудови імітаційної моделі ТКМ використані умовні позначення, наведені в табл. 6.1.

Для розрахунку резервного мультишляху, який використовується для захисту, наприклад, десятого вузла (маршрутизатора), структура імітаційної моделі набуває вигляду, який представлено на рис. 6.10. Тоді в межах заданих структур імітаційної моделі (рис. 6.9 та 6.10), функціонування ТКМ відповідно до рис. 6.2 також проводиться поетапно.

На *першому етапі* (рис. 6.2) для функціонування імітаційної моделі ТКМ для аналізу *основного* мультишляху задавалися кількість вузлів-маршрутизаторів, каналів зв'язку, ємність буфера на інтерфейсах маршрутизаторів та пропускні здатності каналів зв'язку. Фрагмент лістингу коду налаштувань представлено на рис. 6.11.

Таблиця 6.1

## Умовні позначення елементів мережі в симуляторі NS3

Умовні позначення	Елементи мережі
	Вузол генерації потоку трафіка, який надходить у мережу. Цей вузол не входить до заданої топології мережі.
	Вузол-відправник.
	Проміжні вузли, які виконують функції маршрутизаторів у ТКМ.
	Вузол-отримувач.
	Канали зв'язку між вузлами.
	Вузол, який дозволяє виміряти характеристики трафіка на виході з ТКМ, тобто інтенсивності потоків пакетів, які успішно передано мережею. Цей вузол не входить до заданої топології мережі та введений для моніторингу отриманих результатів.
 , 	Блоки, що моделюють з'єднання в мережі за допомогою моделі UDP.
	Блок, який запускає процес кодування з постійною швидкістю передачі та використовується в умовах потокової передачі трафіка каналами зв'язку з обмеженою пропускнуою здатністю.

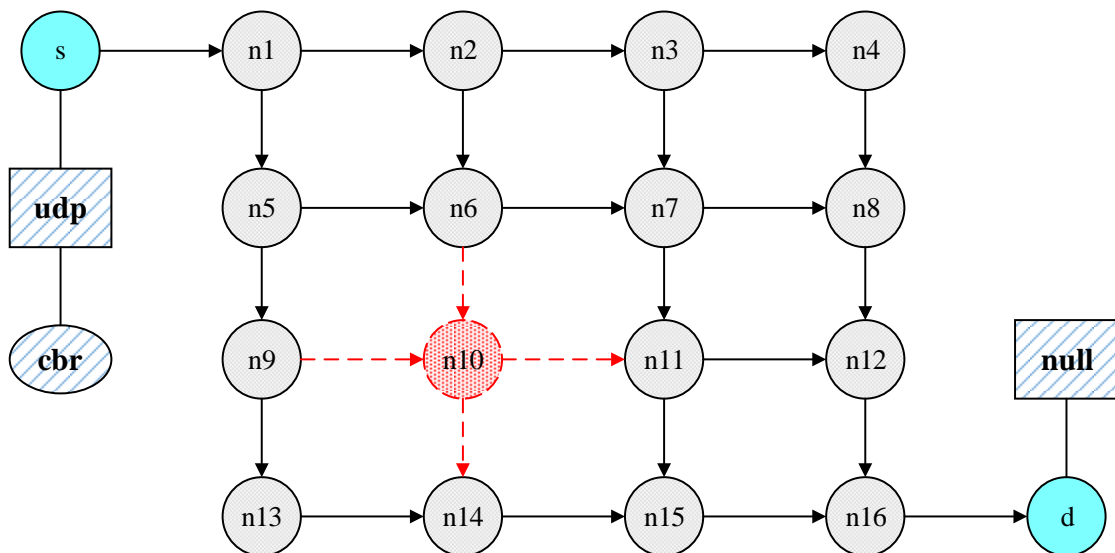


Рис. 6.10. Фрагмент ТКМ, який досліджувався за допомогою симулятора NS3, для аналізу резервного мультишляху

```

NS LOG COMPONENT DEFINE ("TensorRoutingModel");
// Створення вузлів
NS LOG INFO ("Create nodes.");
NodeContainer c;
c.Create (16);
NodeContainer n1n2 = NodeContainer (c.Get (1), c.Get (2));
NodeContainer n1n5 = NodeContainer (c.Get (1), c.Get (5));
NodeContainer n2n3 = NodeContainer (c.Get (2), c.Get (3));
NodeContainer n2n6 = NodeContainer (c.Get (2), c.Get (6));
NodeContainer n3n4 = NodeContainer (c.Get (3), c.Get (4));
NodeContainer n3n7 = NodeContainer (c.Get (3), c.Get (7));
NodeContainer n4n8 = NodeContainer (c.Get (4), c.Get (8));
NodeContainer n5n6 = NodeContainer (c.Get (5), c.Get (6));
NodeContainer n5n9 = NodeContainer (c.Get (5), c.Get (9));
NodeContainer n6n7 = NodeContainer (c.Get (6), c.Get (7));
NodeContainer n6n10 = NodeContainer (c.Get (6), c.Get (10));
NodeContainer n7n8 = NodeContainer (c.Get (7), c.Get (8));
NodeContainer n7n11 = NodeContainer (c.Get (7), c.Get (11));
NodeContainer n8n12 = NodeContainer (c.Get (8), c.Get (12));
NodeContainer n9n10 = NodeContainer (c.Get (9), c.Get (10));
NodeContainer n9n13 = NodeContainer (c.Get (9), c.Get (13));
NodeContainer n10n11 = NodeContainer (c.Get (10), c.Get (11));
NodeContainer n10n14 = NodeContainer (c.Get (10), c.Get (14));
NodeContainer n11n12 = NodeContainer (c.Get (11), c.Get (12));
NodeContainer n11n15 = NodeContainer (c.Get (11), c.Get (15));
NodeContainer n12n16 = NodeContainer (c.Get (12), c.Get (16));
NodeContainer n13n14 = NodeContainer (c.Get (13), c.Get (14));
NodeContainer n14n15 = NodeContainer (c.Get (14), c.Get (15));
NodeContainer n15n16 = NodeContainer (c.Get (15), c.Get (16));

// Створення каналів зв'язку без IP адресації
NS LOG INFO ("Create channels.");
PointToPointHelper p2p;
NetDeviceContainer d1d2 = p2p.Install (n1n2);
p2p.SetDeviceAttribute ("DataRate", StringValue ("440"));
NetDeviceContainer d1d5 = p2p.Install (n1n5);
p2p.SetDeviceAttribute ("DataRate", StringValue ("485"));
NetDeviceContainer d2d3 = p2p.Install (n2n3);
p2p.SetDeviceAttribute ("DataRate", StringValue ("240"));
...
NetDeviceContainer d15d16 = p2p.Install (n15n16);
p2p.SetDeviceAttribute ("DataRate", StringValue ("325"));

```

Рис. 6.11. Лістинг коду для опису структури ТКМ для аналізу основного маршруту на першому етапі моделювання

Зауважимо, що для захисті вузла (маршрутизатора) підлягають захисту одночасно й відповідні інциденті цьому вузлу канали зв'язку, як показано на рис. 6.10. Отже, для аналізу резервного мультишляху на *першому етапі* необхідно виключити (закоментувати) десятий вузол (n10) із зазначеними пунктиром каналами зв'язку (n6n10, n9n10, n10n11 та n10n14). Фрагмент лістингу коду налаштувань наведений на рис. 6.12.

```

NS LOG COMPONENT DEFINE ("TensorFastReRoutingModel");
// Створення вузлів
NS LOG INFO ("Create nodes.");
NodeContainer c;
c.Create (15);
NodeContainer n1n2 = NodeContainer (c.Get (1), c.Get (2));
NodeContainer n1n5 = NodeContainer (c.Get (1), c.Get (5));
NodeContainer n2n3 = NodeContainer (c.Get (2), c.Get (3));
NodeContainer n2n6 = NodeContainer (c.Get (2), c.Get (6));
NodeContainer n3n4 = NodeContainer (c.Get (3), c.Get (4));
NodeContainer n3n7 = NodeContainer (c.Get (3), c.Get (7));
NodeContainer n4n8 = NodeContainer (c.Get (4), c.Get (8));
NodeContainer n5n6 = NodeContainer (c.Get (5), c.Get (6));
NodeContainer n5n9 = NodeContainer (c.Get (5), c.Get (9));
NodeContainer n6n7 = NodeContainer (c.Get (6), c.Get (7));
// NodeContainer n6n10 = NodeContainer (c.Get (6), c.Get (10));
NodeContainer n7n8 = NodeContainer (c.Get (7), c.Get (8));
NodeContainer n7n11 = NodeContainer (c.Get (7), c.Get (11));
NodeContainer n8n12 = NodeContainer (c.Get (8), c.Get (12));
// NodeContainer n9n10 = NodeContainer (c.Get (9), c.Get (10));
NodeContainer n9n13 = NodeContainer (c.Get (9), c.Get (13));
// NodeContainer n10n11 = NodeContainer (c.Get (10), c.Get (11));
// NodeContainer n10n14 = NodeContainer (c.Get (10), c.Get (14));
NodeContainer n11n12 = NodeContainer (c.Get (11), c.Get (12));
NodeContainer n11n15 = NodeContainer (c.Get (11), c.Get (15));
NodeContainer n12n16 = NodeContainer (c.Get (12), c.Get (16));
NodeContainer n13n14 = NodeContainer (c.Get (13), c.Get (14));
NodeContainer n14n15 = NodeContainer (c.Get (14), c.Get (15));
NodeContainer n15n16 = NodeContainer (c.Get (15), c.Get (16));

// Створення каналів зв'язку без IP адресації (без каналів 6-10, 9-10, 10-11, 10-14
NS LOG INFO ("Create channels.");
PointToPointHelper p2p;
NetDeviceContainer d1d2 = p2p.Install (n1n2);
p2p.SetDeviceAttribute ("DataRate", StringValue ("440"));
NetDeviceContainer d1d5 = p2p.Install (n1n5);
p2p.SetDeviceAttribute ("DataRate", StringValue ("485"));
NetDeviceContainer d2d3 = p2p.Install (n2n3);
p2p.SetDeviceAttribute ("DataRate", StringValue ("240"));
...
NetDeviceContainer d15d16 = p2p.Install (n15n16);
p2p.SetDeviceAttribute ("DataRate", StringValue ("325"));

```

Рис. 6.12. Лістинг коду для опису структури ТКМ для розрахунку резервного мультишляху на першому етапі моделювання

Варто зазначити, що всі маршрутні налаштування містяться в файлі `simple-alternate-routing.cc`, який запускається за допомогою [Ipv4GlobalRoutingHelper](#), а ємність буфера черг відповідно до системи масового обслуговування М/М/1/Н встановлювалася під час конфігурації додаткового файлу `queue-disc.h` та становила 30 пакетів.

На *другому етапі* моделювання ТКМ для аналізу основного мультишляху завдяки функціоналу NS3 налаштовувалися функціональні характеристики запропонованих рішень, тобто у файлі `simple-alternate-routing-1.cc` прописувалися всі наявні шляхи між вузлом-відправником та вузлом-

отримувачем відповідно до фрагмента ТКМ, що досліджується, тобто налаштовувалися всі вузли (маршрутизатори) мережі з ініціалізацією бази маршрутних даних.

На *другому етапі* функціонування імітаційної моделі ТКМ для аналізу резервного мультишляху задавалася конфігурація створеної мережі відповідно до зміненої структури внаслідок захисту десятого вузла та суміжних із ним каналів зв'язку, тобто прописувалися всі доступні шляхи між вузлом-відправником та вузлом-отримувачем. Фрагменти лістингу коду налаштувань для дослідження тензорної моделі швидкої перемаршрутизації в умовах використання основного та резервного мультишляхів представлений відповідно на рис 6.13 та 6.14.

На *третьому етапі* функціонування імітаційної моделі здійснювалась генерація потоку трафіка з інтенсивністю 430 пакетів за секунду, а до показників якості обслуговування висувалися такі вимоги:  $\tau_{\langle don \rangle} = 150$  мс,  $p_{\langle don \rangle} = 0,015$ . Фрагмент відповідного лістингу коду налаштувань для основного та резервного мультишляхів наведений на рис. 6.15 та 6.16 відповідно.

Для збору та подальшого аналізу отриманих результатів моделювання, а саме оцінки таких показників якості обслуговування, як середня міжкінцева затримка та ймовірність втрат пакетів, за допомогою симулятора NS3 створювалися такі лог-файли:

- для оцінки рівня втрат пакетів: *packet-loss-counter.h*;
- для оцінки середньої міжкінцевої затримки: *flow-monitor.h*.

У подальшому для наочного та зручного представлення результатів моделювання було здійснено підключення до джерел трасування, наданих класами ndnSIM, а саме `ndn::L3RateTracer`, які збирають та агрегують статистичну інформацію в текстові файли.



```

NS LOG COMPONENT DEFINE ("TensorFastReRoutingModel");
// Конфігурація мережі для дослідження швидкої перемаршрутизації (основний мультишлях)
NS LOG INFO ("Assign IP Addresses.");
Ipv4AddressHelper ipv4;
ipv4.SetBase ("10.1.1.0", "255.255.255.0");
ipv4.Assign (n1);

ipv4.SetBase ("10.1.2.0", "255.255.255.0");
ipv4.Assign (n2);
...
...
ipv4.SetBase ("10.1.10.0", "255.255.255.0");
ipv4.Assign (n10);
...
...

ipv4.SetBase ("10.1.16.0", "255.255.255.0");
ipv4.Assign (n16);

```

Рис. 6.13. Лістинг коду для конфігурації ТКМ у використанні основного мультишляху на другому етапі моделювання

```

NS LOG COMPONENT DEFINE ("TensorFastReRoutingModel");
// Конфігурація мережі для дослідження швидкої перемаршрутизації (резервний мультишлях)
NS LOG INFO ("Assign IP Addresses.");
Ipv4AddressHelper ipv4;
ipv4.SetBase ("10.1.1.0", "255.255.255.0");
ipv4.Assign (n1);

ipv4.SetBase ("10.1.2.0", "255.255.255.0");
ipv4.Assign (n2);
...
...
// ipv4.SetBase ("10.1.10.0", "255.255.255.0");
// ipv4.Assign (n10);
...
...

ipv4.SetBase ("10.1.16.0", "255.255.255.0");
ipv4.Assign (n16);

```

Рис. 6.14. Лістинг коду для конфігурації ТКМ у використанні резервного мультишляху на другому етапі моделювання

```

// Запуск та зупинка симулятора генерувати UDP датаграми
NS LOG INFO ("Генерація потоку трафіка (основний мультишлях)");

// Генерація потоку трафіку з першого вузла для призначеного шістнадцятого вузла
OnOffHelper onoff ("ns3::UdpSocketFactory",
Address (InetSocketAddress (Ili2.GetAddress (1), port)));
onoff.SetConstantRate (DataRate ("430"));

ApplicationContainer apps = onoff.Install (c.Get (16));
apps.Start (Seconds (1.1));
apps.Stop (Seconds (10.0));

// Створення приймача пакетів для одержування переданих пакетів
PacketSinkHelper sink ("ns3::UdpSocketFactory",
Address (InetSocketAddress (Ipv4Address::GetAny (n16), port)));
apps = sink.Install (c.Get (16));
apps.Start (Seconds (1.1));
apps.Stop (Seconds (10.0));

AsciiTraceHelper ascii;
p2p.EnableAsciiAll (ascii.CreateFileStream ("simple-alternate-routing-1.tr"));
p2p.EnablePcapAll ("simple-alternate-routing-1");

NS LOG INFO ("Run Simulation.");
Simulator::Run ();
Simulator::Destroy ();
NS LOG INFO ("Done.");

```

Рис. 6.15. Лістинг коду для генерації потоку трафіка в ТКМ у використанні основного мультишляху на третьому етапі моделювання

```

// Запуск та зупинка симулятора генерувати UDP датаграми
NS LOG INFO ("Генерація потоку трафіка (резервний мультишлях)");

// Генерація потоку трафіку з першого вузла для призначеного шістнадцятого вузла
OnOffHelper onoff ("ns3::UdpSocketFactory",
Address (InetSocketAddress (Ili2.GetAddress (1), port)));
onoff.SetConstantRate (DataRate ("430"));

ApplicationContainer apps = onoff.Install (c.Get (16));
apps.Start (Seconds (1.1));
apps.Stop (Seconds (10.0));

// Створення приймача пакетів для одержування переданих пакетів
PacketSinkHelper sink ("ns3::UdpSocketFactory",
Address (InetSocketAddress (Ipv4Address::GetAny (n16), port)));
apps = sink.Install (c.Get (16));
apps.Start (Seconds (1.1));
apps.Stop (Seconds (10.0));

AsciiTraceHelper ascii;
p2p.EnableAsciiAll (ascii.CreateFileStream ("simple-alternate-fastrerouting-1.tr"));
p2p.EnablePcapAll ("simple-alternate-fastrerouting-1");

NS LOG INFO ("Run Simulation.");
Simulator::Run ();
Simulator::Destroy ();
NS LOG INFO ("Done.");

```

Рис. 6.16. Лістинг коду для генерації потоку трафіка в ТКМ у використанні резервного мультишляху на третьому етапі моделювання

Для подальшого аналізу значень середньої затримки та ймовірності втрат пакетів уздовж основного маршруту були створені відповідні файли `tensorroute-delay-rate-trace.txt` та `tensorroute-loss-rate-trace.txt`, зміст яких представлений на рис. 6.17 та 6.18 відповідно.

```
# tensorroute-delay-rate-trace.txt
```

link

#	from	to	capacity	delay	queue
n1	n1	n2	440	5ms	30
n1	n1	n5	485	5ms	30
n2	n2	n3	240	9ms	30
n2	n2	n6	175	11ms	30
n3	n3	n4	150	10ms	30
n3	n3	n7	215	6ms	30
n4	n4	n8	180	8ms	30
n5	n5	n6	200	11ms	30
n5	n5	n9	200	14ms	30
n6	n6	n7	190	6ms	30
n6	n6	n10	280	10ms	30
n7	n7	n8	120	12ms	30
n7	n7	n11	140	12ms	30
n8	n8	n12	130	19ms	30
n9	n9	n10	270	5ms	30
n9	n9	n13	190	6ms	30
n10	n10	n11	300	6ms	30
n10	n10	n14	310	5ms	30
n11	n11	n12	150	17ms	30
n11	n11	n15	180	11ms	30
n12	n12	n16	315	7ms	30
n13	n13	n14	210	6ms	30
n14	n14	n15	270	12ms	30
n15	n15	n16	325	15ms	30

Рис. 6.17. Результати моніторингу середньої затримки пакетів під час дослідження основного мультишляху в ТКМ

```
# tensorroute-loss-rate-trace.txt
```

link

#	from	to	capacity	loss	queue
n1	n1	n2	440	0	30
n1	n1	n5	485	0	30
n2	n2	n3	240	0	30
n2	n2	n6	175	0	30
n3	n3	n4	150	0	30
n3	n3	n7	215	0	30
n4	n4	n8	180	0	30
n5	n5	n6	200	0	30
n5	n5	n9	220	0	30
n6	n6	n7	190	0	30
n6	n6	n10	280	1	30
n7	n7	n8	120	0	30
n7	n7	n11	140	0	30
n8	n8	n12	130	0	30
n9	n9	n10	270	0	30
n9	n9	n13	190	0	30
n10	n10	n11	300	0	30
n10	n10	n14	310	0	30
n11	n11	n12	150	0	30
n11	n11	n15	180	0	30
n12	n12	n16	315	0	30
n13	n13	n14	210	0	30
n14	n14	n15	270	1	30
n15	n15	n16	325	1	30

Рис. 6.18. Результати моніторингу рівня втрат пакетів під час дослідження основного мультишляху в ТКМ

Унаслідок моделювання ТКМ у використанні резервного мультишляху було створено файли `tensorfastreroute-delay-rate-trace-1.txt` та `tensorfastreroute-loss-rate-trace-1.txt`, у яких представлені результати дослідження відповідних показників затримки та ймовірності втрат пакетів, як показано на рис. 6.19 та 6.20 відповідно.

Узагальнені результати імітаційного моделювання, отримані за допомогою симулятора NS3, та порівняння їх з аналітичними рішеннями (MATLAB) представлено в табл. 6.2.

```
# tensorfastreroute-delay-rate-trace-1.txt
```

link

# from	to	capacity	delay	queue
n1	n2	440	5ms	30
n1	n5	485	5ms	30
n2	n3	240	13ms	30
n2	n6	175	9ms	30
n3	n4	150	14ms	30
n3	n7	215	7ms	30
n4	n8	180	10ms	30
n5	n6	200	9ms	30
n5	n9	220	36ms	30
n6	n7	190	12ms	30
n7	n8	120	16ms	30
n7	n11	140	91ms	30
n8	n12	130	89ms	30
n9	n13	190	48ms	30
n11	n12	150	14ms	30
n11	n15	180	10ms	30
n12	n16	315	9ms	30
n13	n14	210	27ms	30
n14	n15	270	12ms	30
n15	n16	325	12ms	30

Рис. 6.19. Результати моніторингу середньої затримки пакетів під час дослідження резервного мультишляху в ТКМ

```
# tensorfastreroute-loss-rate-trace-1.txt
```

link

# from	to	capacity	loss	queue
n1	n2	440	0	30
n1	n5	485	0	30
n2	n3	240	0	30
n2	n6	175	0	30
n3	n4	150	0	30
n3	n7	215	0	30
n4	n8	180	0	30
n5	n6	200	0	30
n5	n9	220	1	30
n6	n7	190	0	30
n7	n8	120	0	30
n7	n11	140	1	30
n8	n12	130	1	30
n9	n13	190	0	30
n11	n12	150	0	30
n11	n15	180	0	30
n12	n16	315	0	30
n13	n14	210	1	30
n14	n15	270	1	30
n15	n16	325	1	30

Рис. 6.20. Результати моніторингу рівня втрат пакетів під час дослідження резервного мультишляху в ТКМ

Таблиця 6.2

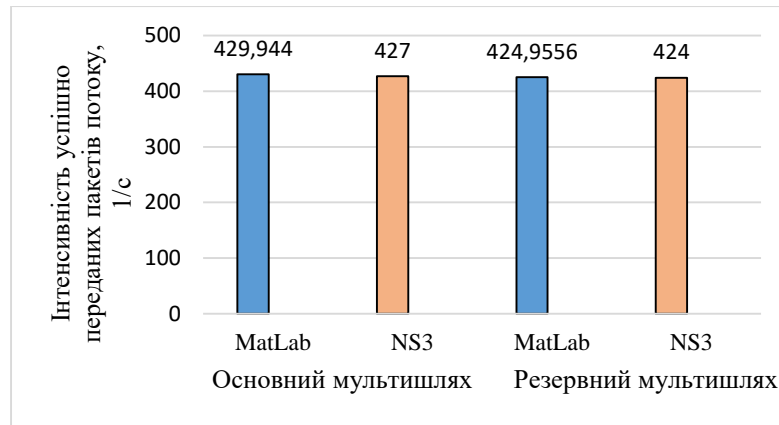
**Порівняльний аналіз результатів аналітичного та імітаційного моделювання процесів швидкої перемаршрутизації із захистом рівня якості обслуговування в ТКМ**

Показники QoS	У процесі використання основного мультишляху		У процесі використання резервного мультишляху	
	MATLAB	NS3	MATLAB	NS3
Інтенсивність успішно переданих пакетів, 1/с	429,944	427	424,9556	424
Імовірність втрат пакетів	0,00013	0,00698	0,01173	0,01395
Середня міжкінцева затримка пакетів, мс	55	58	132,4	140

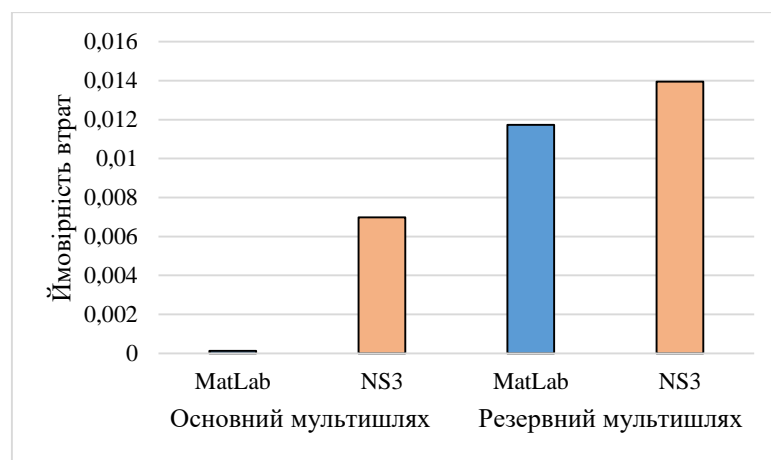
Для наочності результати порівняльного аналізу значень інтенсивності успішно переданих пакетів потоку (1/с), імовірності втрат та середньої міжкінцевої затримки наведені на рис. 6.21. Відповідно до результатів можна зробити висновок щодо рівня адекватності рішень, які отримані за допомогою запропонованої тензорної моделі швидкої перемаршрутизації:

- за інтенсивністю успішно переданих пакетів (продуктивністю мережі) розбіжність результатів аналітичного та імітаційного моделювання становила 6,8 % (під час використання основного мультишляху) та 2,2 % (в умовах використання резервного мультишляху), що призвело до відповідного зростання в різниці ймовірностей втрат пакетів;

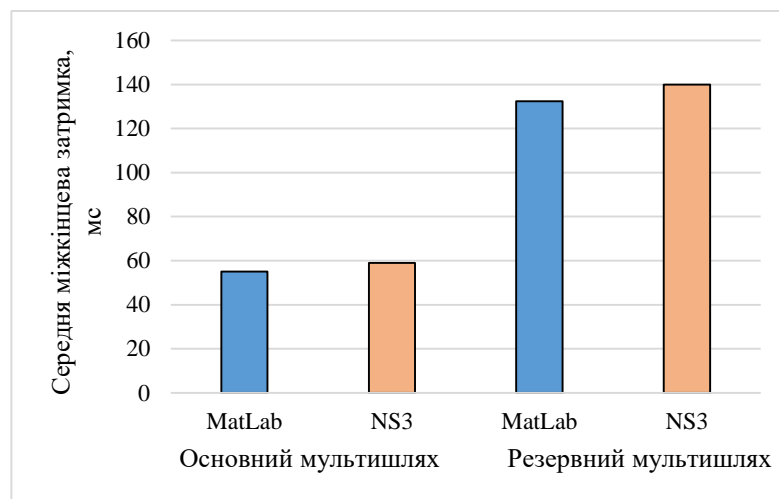
- за середньою міжкінцевою затримкою пакетів розбіжність результатів аналітичного та імітаційного моделювання становила 5,3 % (під час використання основного мультишляху) та 5,4 % (в умовах використання резервного мультишляху).



а) інтенсивність успішно переданих пакетів потоку (1/c)



б) імовірність втрачених пакетів



в) середня міжкінцева затримка (мс)

Рис. 6.21. Результати перевірки адекватності маршрутних рішень, отриманих за допомогою тензорної моделі ТКМ, яка представлена в базисі контурів та вузлових пар

#### 6.1.4. Дослідження тензорної моделі швидкої перемаршрутизації із захистом рівня якості обслуговування за показниками мережної продуктивності в ТКМ, яка представлена в базисі міжполюсних шляхів і внутрішніх вузлових пар, з використанням пакета Network Simulator 3

Для оцінки запропонованої моделі швидкої перемаршрутизації (2.59), (2.64)–(2.74), (3.1)–(3.14), (3.19)–(3.20) мережі, представленої в базисі міжполюсних шляхів і внутрішніх вузлових пар, також проведено імітаційне моделювання за допомогою NS3 для фрагмента телекомунікаційної мережі, яка містить 9 маршрутизаторів і 12 каналів зв'язку (рис. 3.10). Для цього у файлі `simple-alternate-routing-1.cc` були змінені відповідні функціональні налаштування. Дослідження цієї моделі проводилось як і в пункті 6.1.3 в три етапи.

На *першому етапі* було налаштовано структуру ТКМ для використання основного маршруту (рис. 6.22).

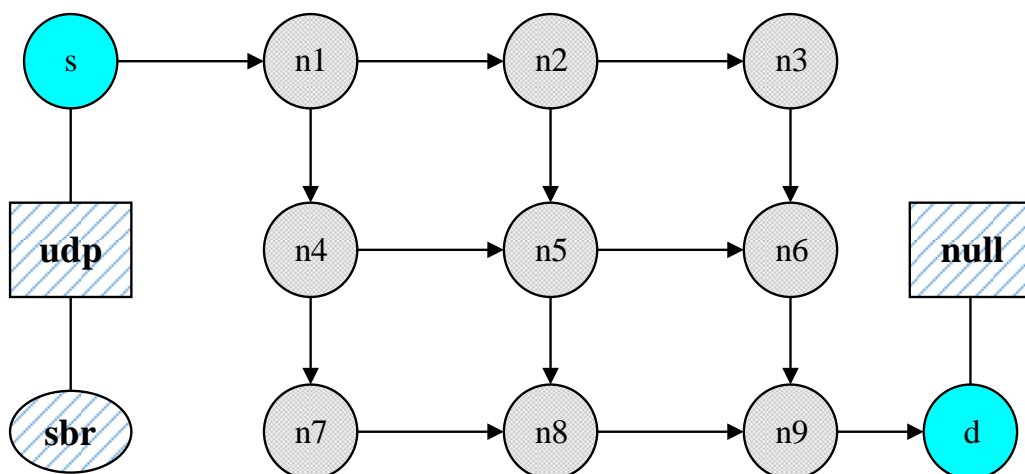


Рис. 6.22. Фрагмент ТКМ, який був налаштований для дослідження основного мультишляху за допомогою симулятора NS3

Для аналізу резервного мультишляху використано структуру ТКМ із захистом сьомого вузла та інцидентних йому каналів зв'язку (рис. 6.23).



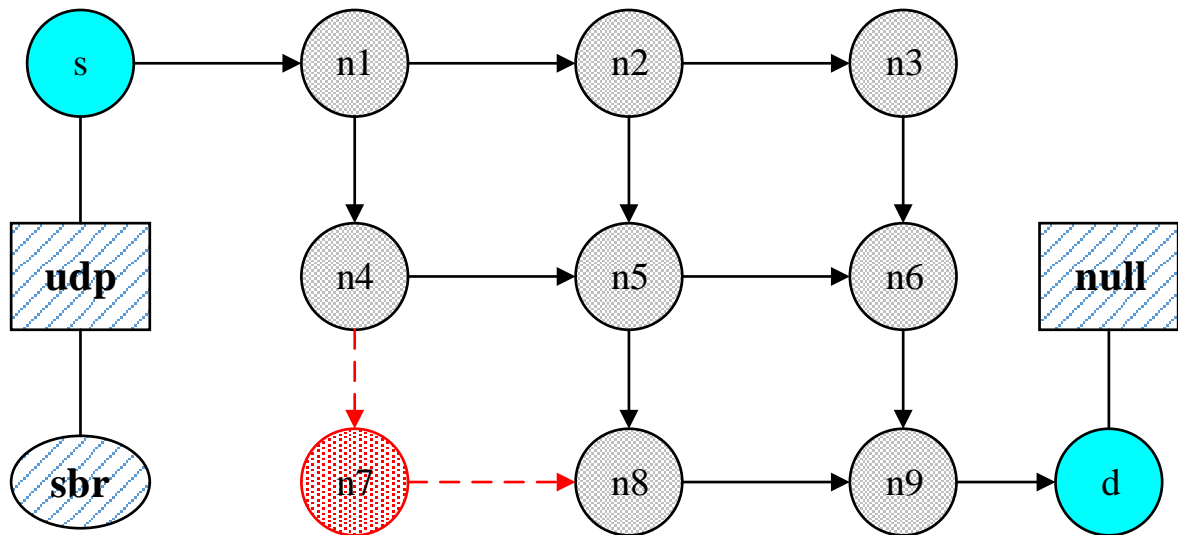


Рис. 6.23. Фрагмент ТКМ, який був налаштований для дослідження резервного мультишляху за допомогою симулятора NS3

Для розрахунку резервного мультишляху на *першому етапі* необхідно було виключити (закоментувати) сьомий вузол (n7) із зазначеними пунктиром каналами зв'язку (n4n7, n7n8), а на *другому етапі* функціонування додатково ввести умови захисту мережних елементів (каналів зв'язку та вузлів) із відповідною зміною структури ТКМ із прописуванням відповідних шляхів у мережі. Фрагмент лістингу коду налаштувань із файлу «TensorRoutingModel2.h» для дослідження основного мультишляху зображений на рис. 6.24 та 6.25, а фрагмент лістингу коду налаштувань із файлу «TensorFastReRoutingModel2.h» для дослідження резервного мультишляху наведений на рис. 6.26 та 6.27 відповідно.

```

NS LOG COMPONENT DEFINE ("TensorRoutingModel2");
// Створення вузлів
NS LOG INFO ("Create nodes.");
NodeContainer c;
c.Create (9);
NodeContainer n1n2 = NodeContainer (c.Get (1), c.Get (2));
NodeContainer n1n4 = NodeContainer (c.Get (1), c.Get (4));
NodeContainer n2n3 = NodeContainer (c.Get (2), c.Get (3));
NodeContainer n2n5 = NodeContainer (c.Get (2), c.Get (5));
NodeContainer n3n6 = NodeContainer (c.Get (3), c.Get (6));
NodeContainer n4n5 = NodeContainer (c.Get (4), c.Get (5));
NodeContainer n4n7 = NodeContainer (c.Get (4), c.Get (7));
NodeContainer n5n6 = NodeContainer (c.Get (5), c.Get (6));
NodeContainer n5n8 = NodeContainer (c.Get (5), c.Get (8));
NodeContainer n6n9 = NodeContainer (c.Get (6), c.Get (9));
NodeContainer n7n8 = NodeContainer (c.Get (7), c.Get (8));
NodeContainer n8n9 = NodeContainer (c.Get (8), c.Get (9));

// Створення каналів зв'язку без IP адресації
NS LOG INFO ("Create channels.");
PointToPointHelper p2p;
NetDeviceContainer d1d2 = p2p.Install (n1n2);
p2p.SetDeviceAttribute ("DataRate", StringValue ("550"));
NetDeviceContainer d1d4 = p2p.Install (n1n4);
p2p.SetDeviceAttribute ("DataRate", StringValue ("620"));
NetDeviceContainer d2d3 = p2p.Install (n2n3);
p2p.SetDeviceAttribute ("DataRate", StringValue ("180"));
...
...
NetDeviceContainer d8d9 = p2p.Install (n8n9);
p2p.SetDeviceAttribute ("DataRate", StringValue ("260"));

```

Рис. 6.24. Лістинг коду налаштувань структури ТКМ на першому етапі моделювання у використанні основного мультишляху

```

NS LOG COMPONENT DEFINE ("TensorRoutingModel2");
// Конфігурація мережі
NS LOG INFO ("Assign IP Addresses.");
Ipv4AddressHelper ipv4;
ipv4.SetBase ("10.1.1.0", "255.255.255.0");
ipv4.Assign (n1);

ipv4.SetBase ("10.1.2.0", "255.255.255.0");
ipv4.Assign (n2);
...
...

ipv4.SetBase ("10.1.9.0", "255.255.255.0");
ipv4.Assign (n9);

// Створення файлу з налаштуваннями відповідно до отриманих моделей маршрутизації
Ipv4GlobalRoutingHelper::PopulateRoutingTables ();

```

Рис. 6.25. Лістинг коду налаштувань ТКМ на другому етапі моделювання у використанні основного мультишляху

```

NS LOG COMPONENT DEFINE ("TensorFastReRoutingModel2");
// Створення вузлів
NS LOG INFO ("Create nodes.");
NodeContainer c;
c.Create (8);
NodeContainer n1n2 = NodeContainer (c.Get (1), c.Get (2));
NodeContainer n1n4 = NodeContainer (c.Get (1), c.Get (4));
NodeContainer n2n3 = NodeContainer (c.Get (2), c.Get (3));
NodeContainer n2n5 = NodeContainer (c.Get (2), c.Get (5));
NodeContainer n3n6 = NodeContainer (c.Get (3), c.Get (6));
NodeContainer n4n5 = NodeContainer (c.Get (4), c.Get (5));
// NodeContainer n4n7 = NodeContainer (c.Get (4), c.Get (7));
NodeContainer n5n6 = NodeContainer (c.Get (5), c.Get (6));
NodeContainer n5n8 = NodeContainer (c.Get (5), c.Get (8));
NodeContainer n6n9 = NodeContainer (c.Get (6), c.Get (9));
// NodeContainer n7n8 = NodeContainer (c.Get (7), c.Get (8));
NodeContainer n8n9 = NodeContainer (c.Get (8), c.Get (9));

// Створення каналів зв'язку без IP адресації
NS LOG INFO ("Create channels.");
PointToPointHelper p2p;
NetDeviceContainer d1d2 = p2p.Install (n1n2);
p2p.SetDeviceAttribute ("DataRate", StringValue ("550"));
NetDeviceContainer d1d4 = p2p.Install (n1n4);
p2p.SetDeviceAttribute ("DataRate", StringValue ("620"));
NetDeviceContainer d2d3 = p2p.Install (n2n3);
p2p.SetDeviceAttribute ("DataRate", StringValue ("180"));
...
...
NetDeviceContainer d8d9 = p2p.Install (n8n9);
p2p.SetDeviceAttribute ("DataRate", StringValue ("260"));

```

Рис. 6.26. Лістинг коду налаштувань структури ТКМ на першому етапі моделювання у використанні резервного мультишляху

```

NS LOG COMPONENT DEFINE ("TensorFastReRoutingModel2");
// Конфігурація мережі
NS LOG INFO ("Assign IP Addresses.");
Ipv4AddressHelper ipv4;
ipv4.SetBase ("10.1.1.0", "255.255.255.0");
ipv4.Assign (n1);

ipv4.SetBase ("10.1.2.0", "255.255.255.0");
ipv4.Assign (n2);
...
...
// ipv4.SetBase ("10.1.7.0", "255.255.255.0");
// ipv4.Assign (n7);

ipv4.SetBase ("10.1.9.0", "255.255.255.0");
ipv4.Assign (n9);

// Створення файлу з налаштуваннями відповідно до отриманих моделей маршрутизації
Ipv4GlobalRoutingHelper::PopulateRoutingTables ();

```

Рис. 6.27. Лістинг коду налаштувань ТКМ на другому етапі моделювання у використанні резервного мультишляху

На *третьому етапі* функціонування імітаційної моделі для аналізу основного та резервного мультишляхів здійснювалась генерація трафіка, коли інтенсивність потоку становила 500 пакетів за секунду (рис. 6.28).

```
// Запуск та зупинка симулятора генерувати UDP датаграми
NS LOG INFO ("Генерація потоку трафіка.Основний мультишлях");

// Генерація потоку трафіку з першого вузла для призначеного шістнадцятого вузла
OnOffHelper onoff ("ns3::UdpSocketFactory",
Address (InetSocketAddress (Ili2.GetAddress (1), port)));
onoff.SetConstantRate (DataRate ("500"));

ApplicationContainer apps = onoff.Install (c.Get (9));
apps.Start (Seconds (1.1));
apps.Stop (Seconds (10.0));

// Створення приймача пакетів для одержування переданих пакетів
PacketSinkHelper sink ("ns3::UdpSocketFactory",
Address (InetSocketAddress (Ipv4Address::GetAny (n16), port)));
apps = sink.Install (c.Get (9));
apps.Start (Seconds (1.1));
apps.Stop (Seconds (10.0));

AsciiTraceHelper ascii;
p2p.EnableAsciiAll (ascii.CreateFileStream ("simple-alternate-routing.tr"));
p2p.EnablePcapAll ("simple-alternate-routing");

NS LOG INFO ("Run Simulation.");
Simulator::Run ();
Simulator::Destroy ();
NS LOG INFO ("Done.");
```

Рис. 6.28. Лістинг коду для генерації трафіка в ТКМ на третьому етапі моделювання у використанні основного мультишляху

Для аналізу середньої міжкінцевої затримки та ймовірності втрат пакетів у використанні основного та резервного мультишляхів (якщо  $p_{\langle don \rangle} = 0,02$ ,  $\tau_{\langle don \rangle} = 150$  мс) було згенеровано файли `tensorroute2-delay-rate-trace.txt` та `tensorroute2-loss-rate-trace.txt`, як показано на рис. 6.29 та 6.30 відповідно.

```
# tensorroute2-delay-rate-trace.txt
```

link

#	from	to	capacity	delay	queue
n1	n1	n2	550	4ms	30
n1	n1	n4	620	3ms	30
n2	n2	n3	180	14ms	30
n2	n2	n5	170	13ms	30
n3	n3	n6	200	12ms	30
n4	n4	n5	350	14ms	30
n4	n4	n7	150	18ms	30
n5	n5	n6	250	13ms	30
n5	n5	n8	210	16ms	30
n6	n6	n9	290	38ms	30
n7	n7	n8	180	12ms	30
n8	n8	n9	260	35ms	30

Рис. 6.29. Результати моніторингу середньої затримки пакетів під час дослідження основного мультишляху в ТКМ

```
# tensorroute2-loss-rate-trace.txt
```

link

#	from	to	capacity	loss	queue
n1	n1	n2	550	0	30
n1	n1	n4	620	0	30
n2	n2	n3	180	0	30
n2	n2	n5	170	0	30
n3	n3	n6	200	0	30
n4	n4	n5	350	0	30
n4	n4	n7	150	0	30
n5	n5	n6	250	0	30
n5	n5	n8	210	0	30
n6	n6	n9	290	1	30
n7	n7	n8	180	1	30
n8	n8	n9	260	2	30

Рис. 6.30. Результати моніторингу рівня втрат пакетів під час дослідження основного мультишляху в ТКМ

Унаслідок моделювання ТКМ для розрахунку резервного мультишляху було створено файли `tensorfastreroute2-delay-rate-trace.txt` та `tensorfastreroute2-loss-rate-trace.txt`, у яких представлені результати дослідження показників затримки та ймовірності втрат пакетів, як показано на рис. 6.31 та 6.32 відповідно.

```
# tensorfastreroute2-delay-rate-trace.txt
```

link

# from	to	capacity	delay	queue
n1	n2	550	4ms	30
n1	n4	620	4ms	30
n2	n3	180	16ms	30
n2	n5	170	54ms	30
n3	n6	200	12ms	30
n4	n5	350	9ms	30
n5	n6	250	14ms	30
n5	n8	210	115ms	30
n6	n9	290	88ms	30
n8	n9	260	19ms	30

Рис. 6.31. Результати моніторингу середньої затримки пакетів під час дослідження резервного мультишляху в ТКМ

```
# tensorfastreroute2-loss-rate-trace.txt
```

link

# from	to	capacity	loss	queue
n1	n2	550	0	30
n1	n4	620	0	30
n2	n3	180	0	30
n2	n5	170	2	30
n3	n6	200	0	30
n4	n5	350	0	30
n5	n6	250	0	30
n5	n8	210	3	30
n6	n9	290	4	30
n8	n9	260	2	30

Рис. 6.32. Результати моніторингу рівня втрат пакетів під час дослідження резервного мультишляху в ТКМ

Узагальнені результати імітаційного моделювання, отримані за допомогою симулятора NS3, та порівняння їх з аналітичними рішеннями, що розраховані з використанням тензорної моделі швидкої перемаршрутизації ТКМ, представлені в базисі міжполюсних шляхів і внутрішніх вузлових пар (MATLAB), показано в табл. 6.3.

Таблиця 6.3

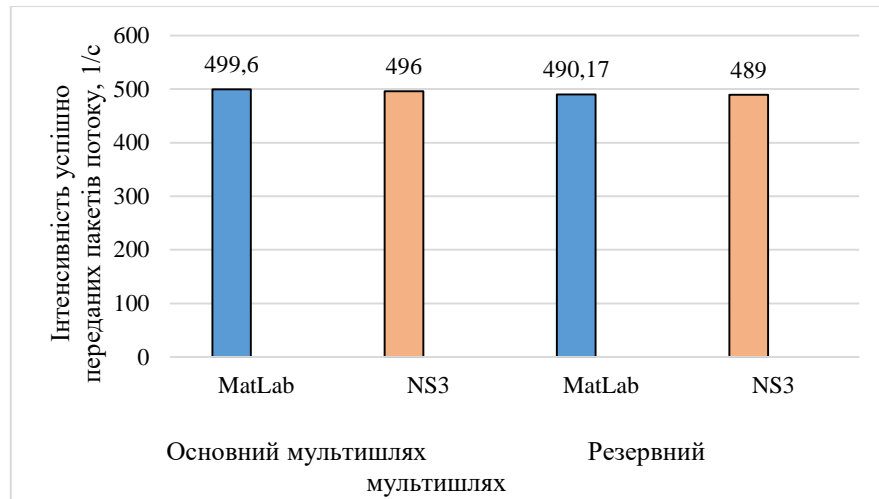
**Порівняльний аналіз результатів аналітичного та імітаційного моделювання процесів швидкої перемаршрутизації із забезпеченням якості обслуговування в ТКМ**

Показники QoS	У процесі використання основного мультишляху		У процесі використання резервного мультишляху	
	MATLAB	NS3	MATLAB	NS3
Інтенсивність успішно переданих пакетів, 1/с	499,6	496	490,17	489
Імовірність втрат пакетів	0,0008	0,008	0,0197	0,022
Середня міжкінцева затримка пакетів, мс	64,8	68	141,1	146,8

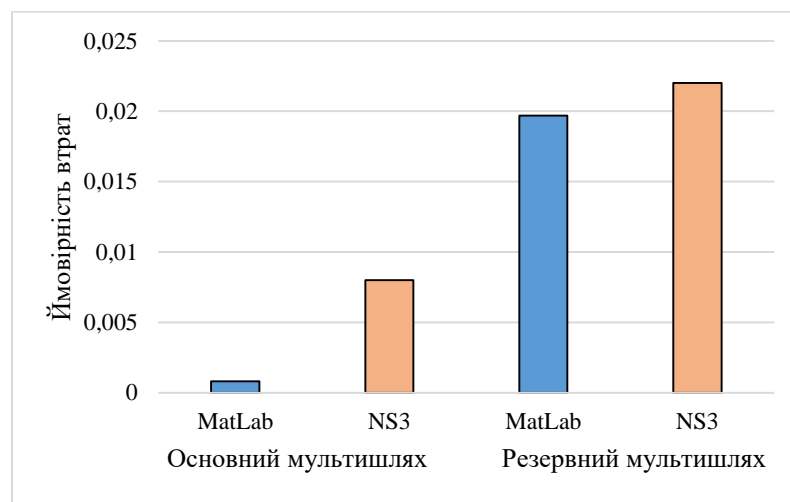
Для наочності наведені в табл. 6.3 результати представлені на рис. 6.33. Відповідно до них можна зробити висновок щодо рівня адекватності рішень, які отримані за допомогою запропонованої тензорної моделі швидкої перемаршрутизації:

- за інтенсивністю успішно переданих пакетів (продуктивністю мережі) розбіжність результатів аналітичного та імітаційного моделювання становила 7,2 % (в умовах використання основного мультишляху) та 2,4 % (у процесі використання резервного мультишляху), що сприяло зростанню різниці в імовірностях втрат пакетів;

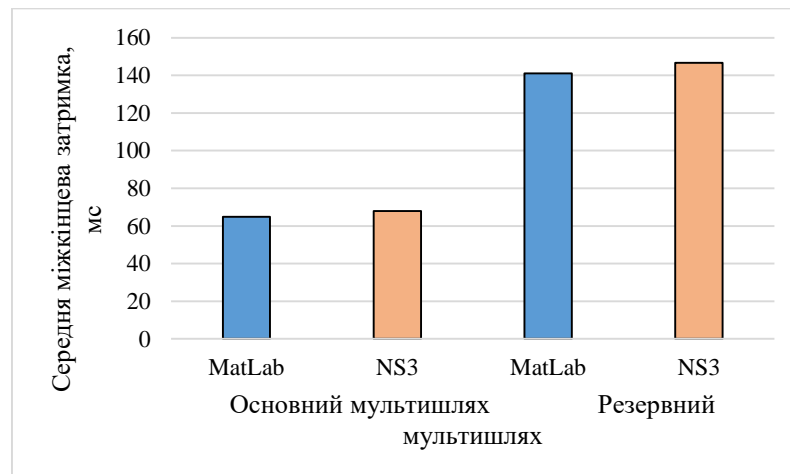
- за середньою міжкінцевою затримкою пакетів розбіжність результатів аналітичного та імітаційного моделювання становила 4,7 % (в умовах використання основного мультишляху) та 3,9 % (у процесі використання резервного мультишляху).



а) інтенсивність успішно переданих пакетів потоку (1/с)



б) імовірність втрачених пакетів



в) середня міжкінцева затримка (мс)

Рис. 6.33. Результати дослідження тензорної моделі швидкої перемаршрутизації в ТКМ, яка представлена в базисі міжполюсних шляхів і внутрішніх вузлових пар



За результатами проведеного дослідження можна зробити висновок про адекватність запропонованих тензорних моделей швидкої перемаршрутизації в ТКМ із захистом рівня якості обслуговування. Висновок ґрунтується на високій збіжності результатів аналітичних розрахунків, проведених у середовищі MATLAB, та результатів імітаційного моделювання в пакеті Network Simulator 3 (табл. 6.2 та 6.3). Так, розбіжність отриманих результатів за продуктивністю ТКМ не перевищувала 7,2 %, а за середньою міжкінцевою затримкою пакетів – 5,4 %.

## **6.2. Дослідження системи тензорних моделей швидкої перемаршрутизації із захистом рівня якості обслуговування, що сприймається кінцевим користувачем, за допомогою IxChariot**

### **6.2.1. Опис базової імітаційної моделі з використанням IxChariot**

Для проведення досліджень розроблених тензорних моделей маршрутизації та швидкої перемаршрутизації трафіка із забезпеченням якості сприйняття послуг, що надаються кінцевим користувачам у телекомунікаційній мережі, за допомогою симулятора IxChariot (ver. 9) створено базову імітаційну модель, яка зображена на рис. 6.34.

Відповідно до зазначеної базової імітаційної моделі ТКМ у блоках вузол-відправник (Source-node) та вузол-отримувач (Destination-node) налаштовувались IP-адреси. Між цими вузлами створювалася топологія мережі (проміжні вузли, канали зв'язку між ними), яка підлягала дослідженню, встановлювався напрямок передачі пакетів трафіка. Головним елементом в імітаційній моделі є блок «Генерації потоку трафіка», у якому можна обрати такі бібліотеки для генерації потоку трафіка [175–182]:

- підтримка протоколів TCP, UDP, RTP і механізмів QoS (на базі IP TOS, DSCP);
- емуляція мовних кодеків, зокрема G.711, G.723, G.726 і G.729;

- емуляція відеокодеків (MPEG-2, H.264);
- емуляція трафіка додатків і мережних сервісів, таких як Real Media, YouTube, Webex, Skype, MSN Messenger, Facebook, Twitter тощо.

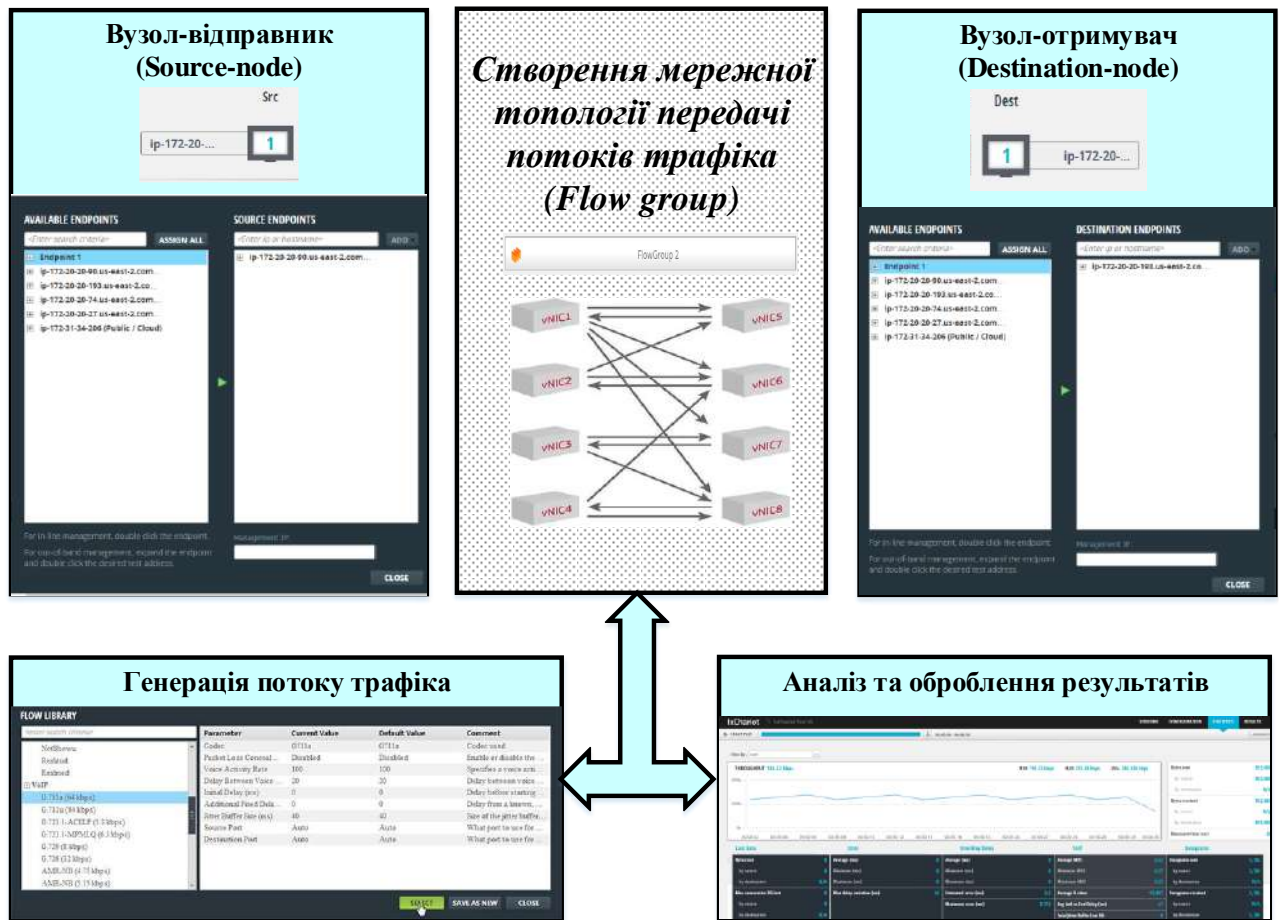


Рис. 6.34. Імітаційна модель ТКМ, побудована за допомогою IxChariot

Так, у межах обраного для генерації потоку трафіка задавалися порт-відправника та порт-отримувача, ємність буфера на інтерфейсах маршрутизатора, а також інтенсивність потоку пакетів. Наприклад, для VoIP трафіка з кодеком G.711a налаштування виглядали так, як показано на рис. 6.35. Крім того, для кожного згенерованого потоку пакетів налаштовувався рівень якості обслуговування відповідно до запропонованих шаблонів, які наведені на рис. 6.36.

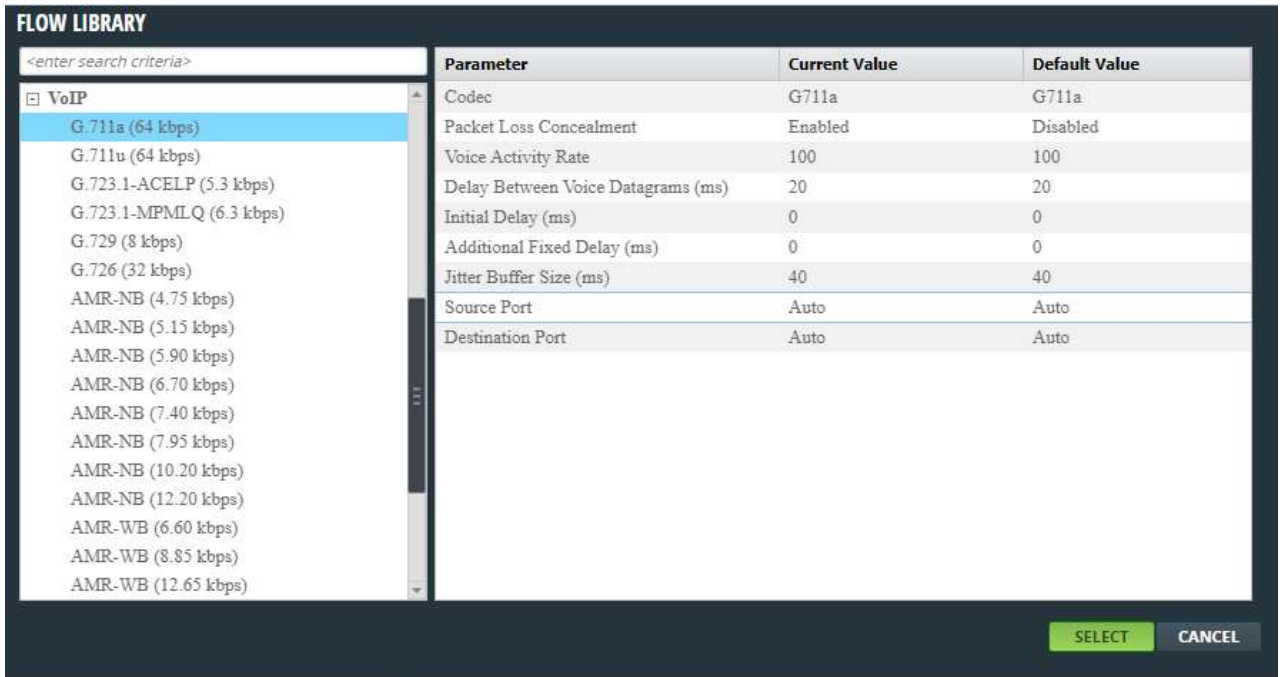


Рис. 6.35. Налаштування для VoIP трафіка з кодеком G.711a

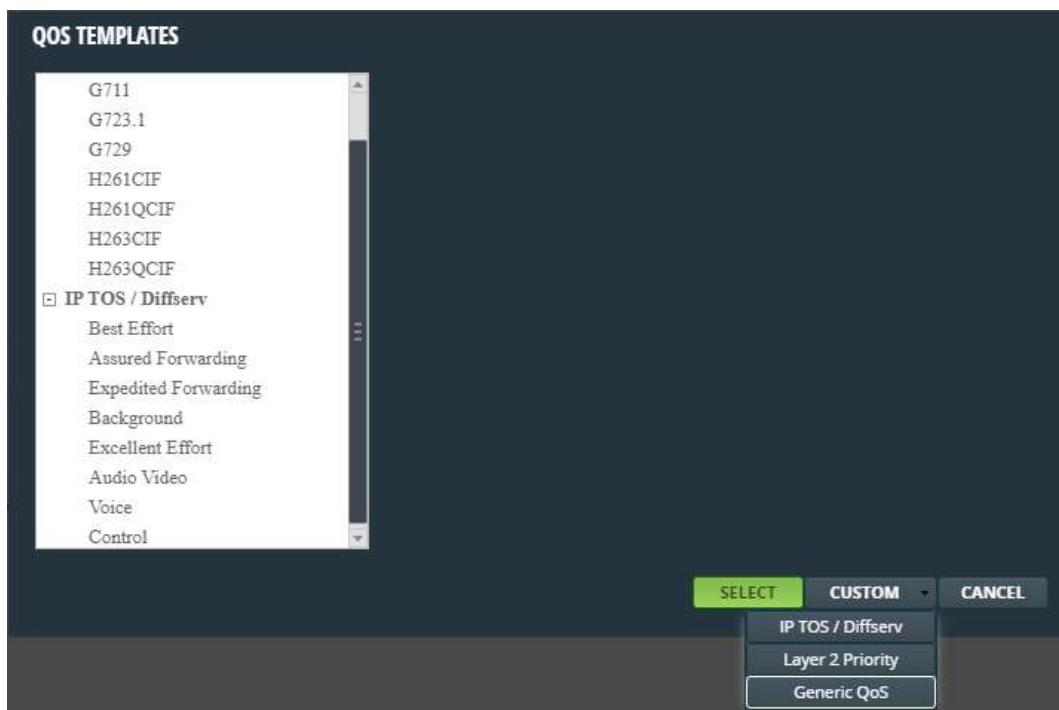


Рис. 6.36. Налаштування параметрів якості обслуговування

Варто зазначити, що для кожної мережної топології в межах пакета IxChariot одночасно можна генерувати декілька різних потоків трафіка, що дозволяє дослідити функціональність ТКМ у режимі ймовірного перевантаження.

Після проведення структурно-функціональних налаштувань проводився запуск консолі IxChariot. Унаслідок імітаційного моделювання були досліджені значення таких показників мережної продуктивності, як пропускна здатність, середня затримка, рівень втрат пакетів, джитер, MOS та R-фактор. Приклад моніторингу основних показників мережної продуктивності в реальному часі наведений на рис. 6.37.

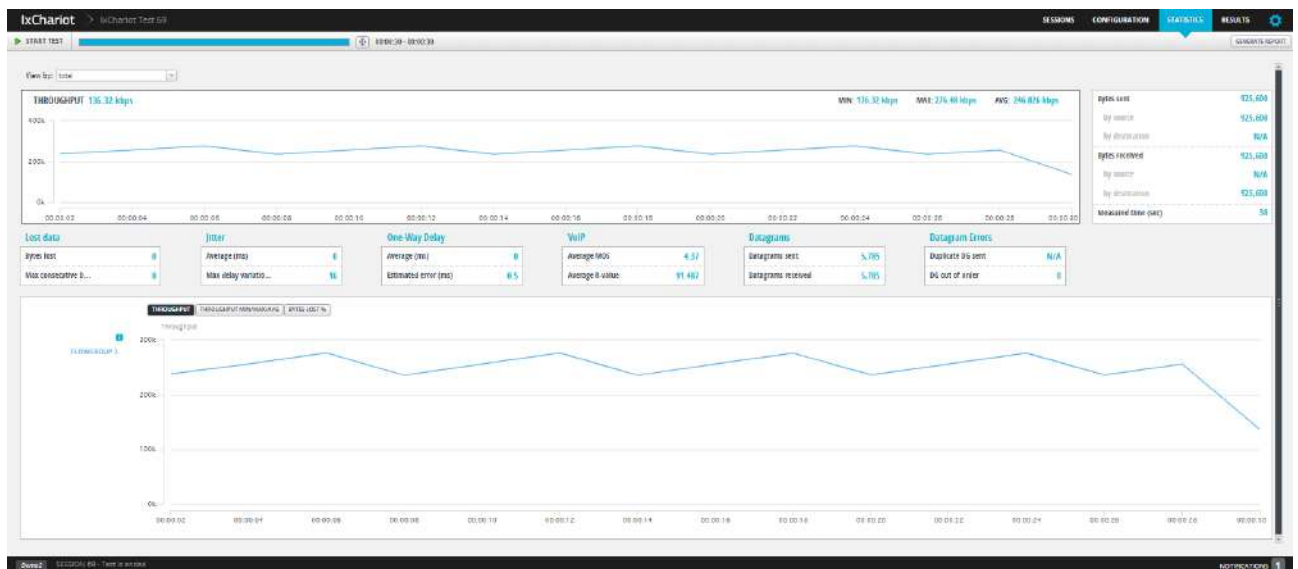


Рис. 6.37. Приклад моніторингу основних показників мережної продуктивності в реальному часі в пакеті IxChariot

## 6.2.2. Дослідження тензорної моделі швидкої перемаршрутизації із захистом рівня якості обслуговування за показником R-фактора за допомогою пакета IxChariot

Для дослідження запропонованої в підрозділі 4.3 тензорної моделі швидкої перемаршрутизації в ТКМ із захистом рівня якості обслуговування за показником R-фактора, яка представлена виразами (2.64), (2.66), (2.71), (3.1)–

(3.7), (3.11), (4.2)–(4.8), (4.13)–(4.17), (4.19), проводилася відповідно до мережних топологій, описаних у четвертому розділі (рис. 4.12 та 4.13).

Так, відповідно до базової імітаційної моделі, у пакеті IxChariot для розрахунку основного мультишляху в ТКМ, зображеної на рис. 4.12, показник R-фактора досліджувався для випадку використання кодеку G.711 VoIP трафіка, оскільки у виразах (4.3)–(4.6) застосовувалися константи зі стандарту ITU-T G.107 для цього типу кодеку. Як вихідні дані задавалися кількість вузлів та каналів зв'язку в мережі, ємність буфера на інтерфейсах маршрутизаторів та тип кодеку (табл. 6.4). Пакети потоку трафіка передавалися під управлінням протоколу UDP.

Таблиця 6.4

**Вихідні дані для дослідження VoIP трафіка з оцінкою R-фактора вздовж  
основного мультишляху в ТКМ**

Вихідні дані	Експеримент 1	Експеримент 2
Тип шляху	Основний	Резервний
Кількість вузлів (маршрутизаторів)	6	
Кількість каналів зв'язку	8	7
Ємність буфера на інтерфейсах маршрутизатора	30	
Кодек	G.711	
Тип потоку	VoIP	
Транспортний протокол моделювання з'єднання	UDP	
Час моделювання, с	10...60	

Результати моделювання ТКМ (Експеримент 1) із розрахунком R-фактора у використанні основного мультишляху в ТКМ із застосуванням кодеку G. 711 зображені на рис. 6.38–6.40.

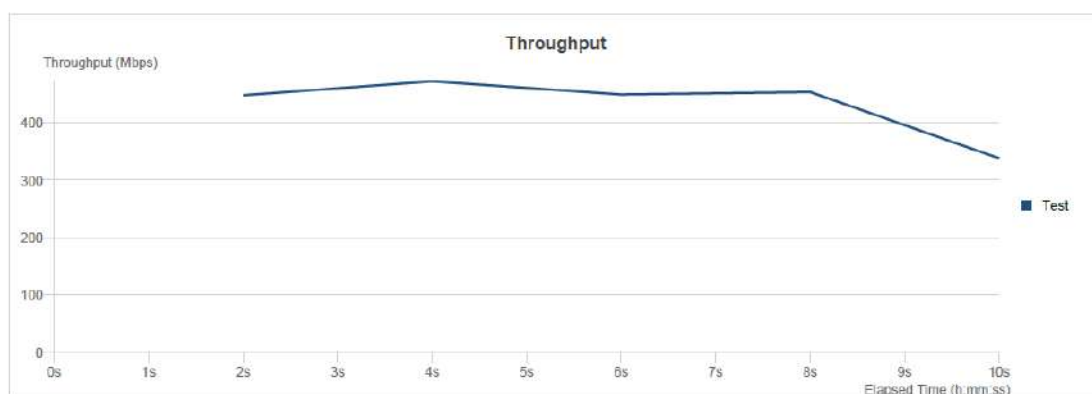


Рис. 6.38. Результати аналізу загальної інтенсивності успішно переданих пакетів у ТКМ під час використання основного мультишляху (Експеримент 1)

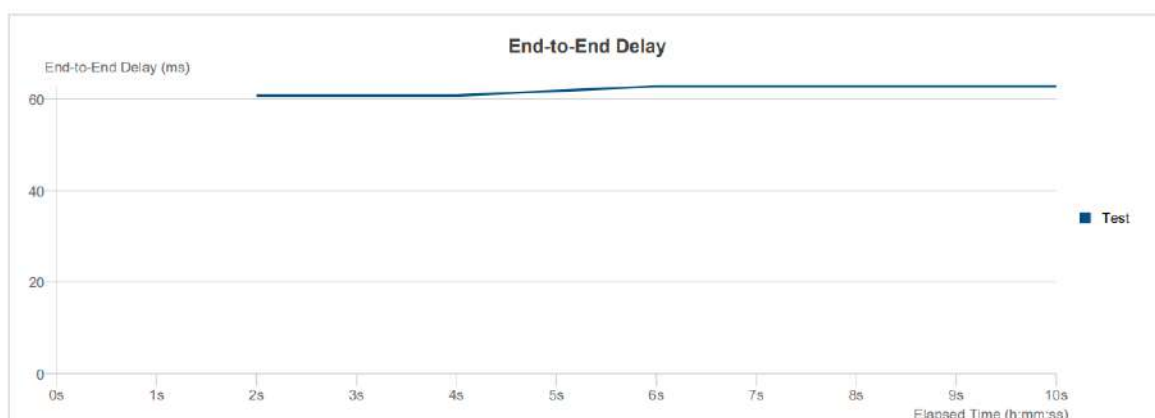


Рис. 6.39. Результати аналізу середньої міжкінцевої затримки пакетів уздовж основного мультишляху в ТКМ (Експеримент 1)

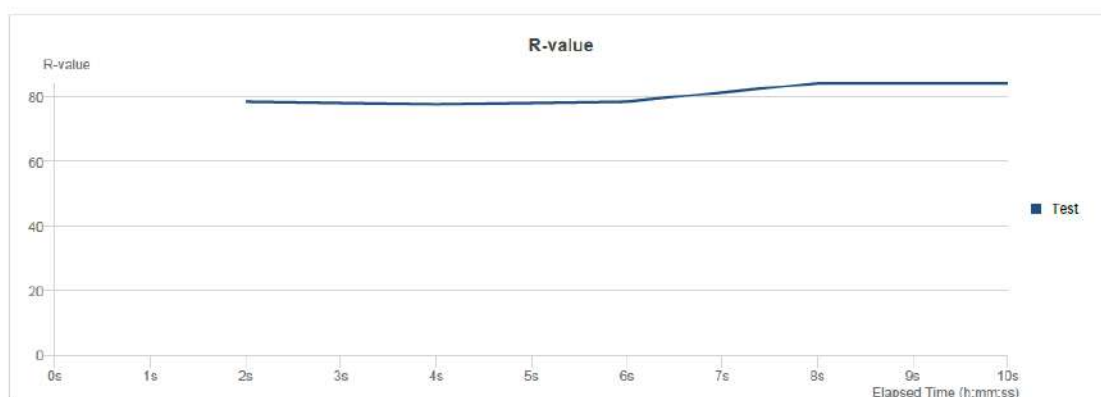


Рис. 6.40. Результати аналізу показника R-фактора вздовж основного мультишляху в ТКМ (Експеримент 1)

У процесі використання резервного мультишляху в ТКМ, яка зображена на рис. 4.13, показник R-фактора в межах пакета IxChariot також досліджувався для кодексу G.711 VoIP трафіка. Вихідні дані для проведення дослідження наведені в табл. 6.4.

Результати моделювання ТКМ (Експеримент 2) із розрахунком R-фактора в умовах використання резервного мультишляху зображені на рис. 6.41–6.43.

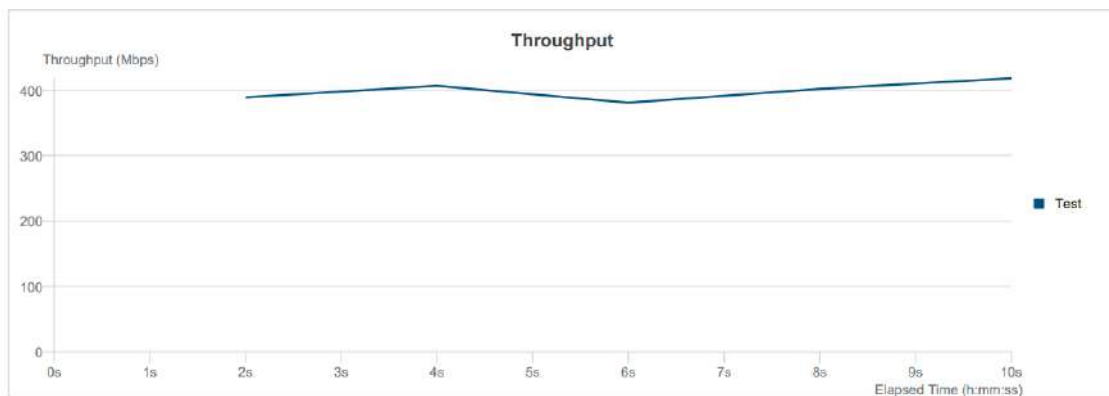


Рис. 6.41. Результати аналізу загальної інтенсивності успішно переданих пакетів у ТКМ під час використання резервного мультишляху (Експеримент 2)

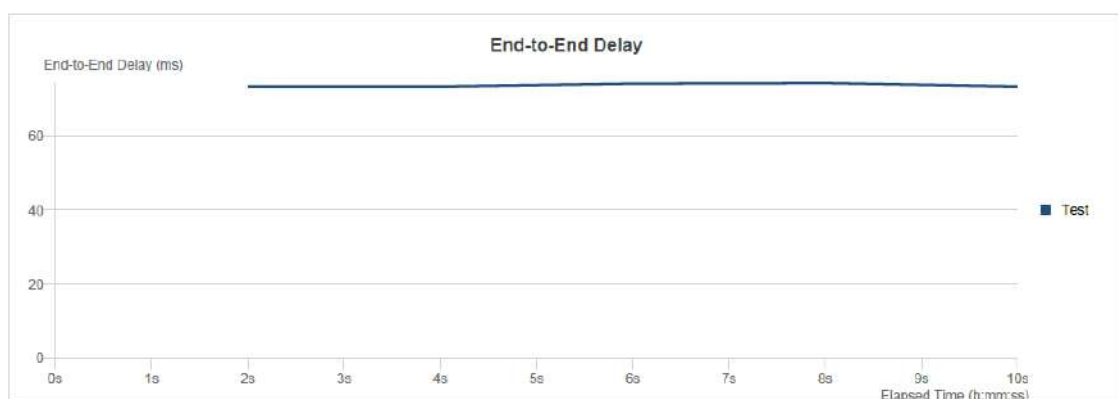


Рис. 6.42. Результати аналізу середньої міжкінцевої затримки вздовж резервного мультишляху в ТКМ (Експеримент 2)

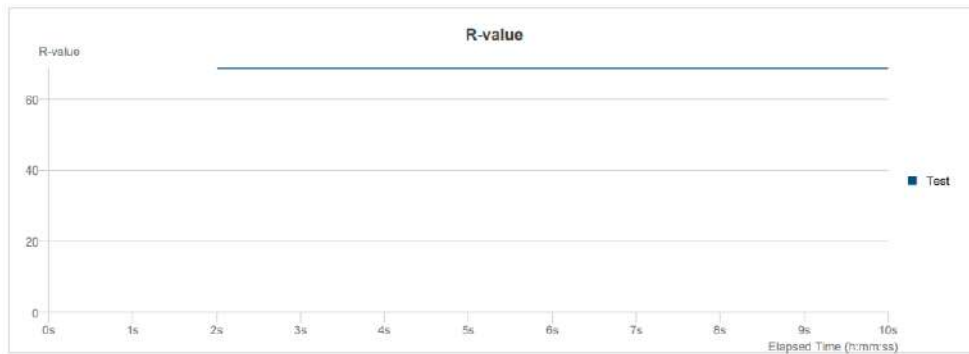


Рис. 6.43. Результати аналізу показника R-фактора вздовж резервного мультишляху в ТКМ (Експеримент 2)

У табл. 6.5 наведені результати порівняльного аналізу рішень щодо забезпечення якості обслуговування за показником R-фактора, отриманих в середовищі MATLAB за допомогою тензорної моделі швидкої перемаршрутизації (табл. 4.5), представленої в базисі контурів та вузлових пар виразами (2.59), (2.64), (2.71), (3.1)–(3.20), (4.2)–(4.6), (4.8), (4.9), (4.13)–(4.15), (4.17), (4.18), та пакета імітаційного моделювання IxChariot.

Таблиця 6.5

**Порівняльний аналіз рішень задачі швидкої QoE-перемаршрутизації із захистом рівня якості обслуговування за показником R-фактора, отриманих за допомогою пакетів MATLAB та IxChariot**

Показник NP/QoE	У процесі використання основного мультишляху		У процесі використання резервного мультишляху	
	MATLAB	IxChariot G.711	MATLAB	IxChariot G.711
R-фактор	83,6737	81,3976	70,5335	68,631
Ta, мс	57,7	62,2	71,3	75,2
Ppl, %	0,48	0,61	1,35	1,5



Для наочності отримані значення R-фактора за допомогою пакетів MatLab та IxChariot зображені на рис. 6.44.

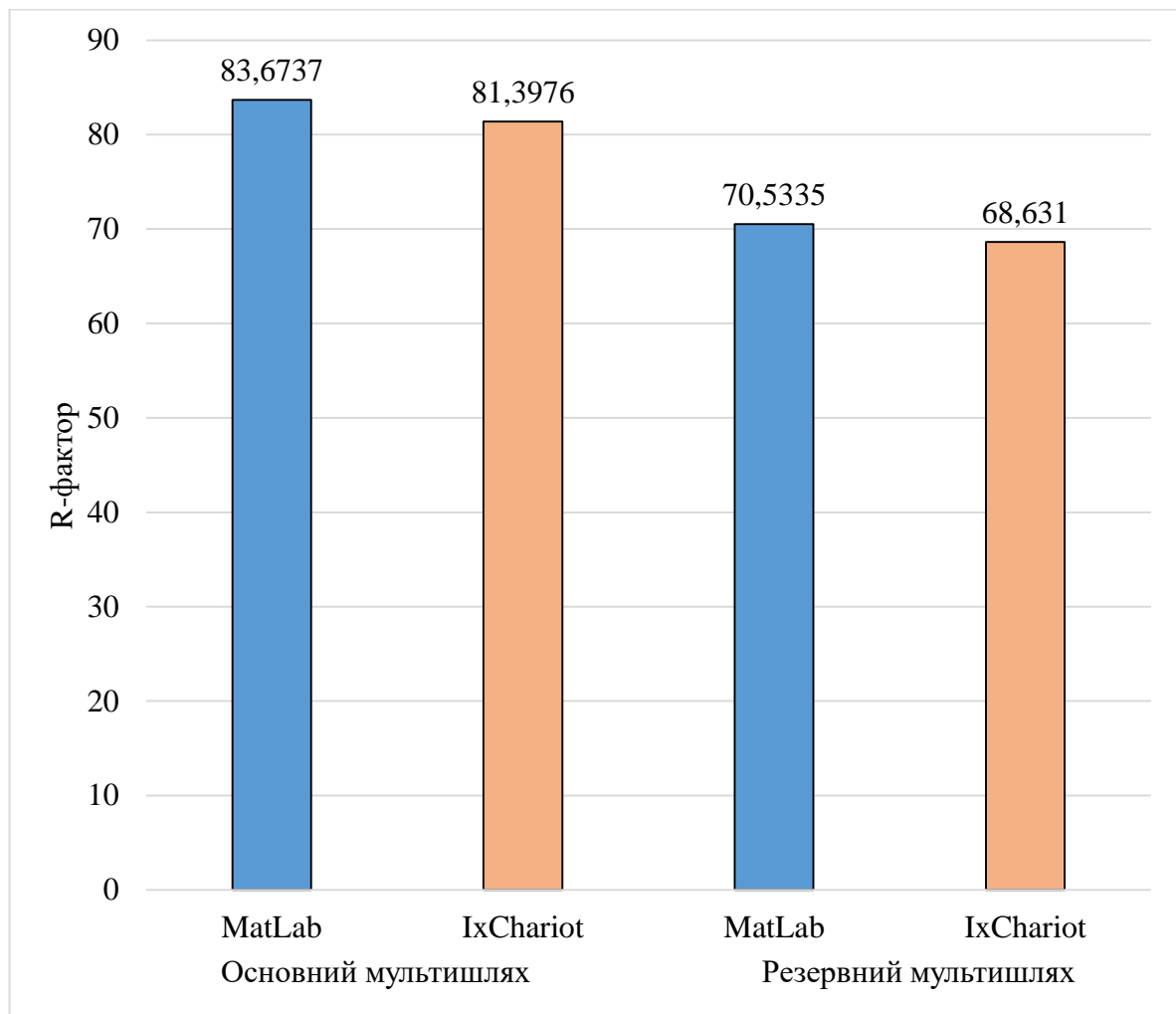


Рис. 6.44. Результати порівняльного аналізу отриманих значень R-фактора за допомогою пакетів MatLab та IxChariot

Відповідно до отриманих результатів (рис. 6.44) можна зробити висновок про прийнятну розбіжність у результатах аналітичних розрахунків R-фактора, отриманих за допомогою тензорної моделі швидкої QoE-перемаршрутизації (2.64), (2.66), (2.71), (3.1)–(3.7), (3.11), (4.2)–(4.8), (4.13)–(4.17), (4.19), та імітаційного моделювання. Вона становила 2,8 % під час аналізу основного мультишляху та 2,77 % за умови використання резервного мультишляху. До того ж розбіжність у показниках мережної продуктивності залишилася на попередньому рівні (табл. 6.2, 6.3).

### 6.2.3. Дослідження тензорної моделі швидкої перемаршрутизації із захистом рівня мультимедійної якості за допомогою пакета IxChariot

Для дослідження тензорної моделі швидкої QoE-перемаршрутизації із захистом рівня мультимедійної якості, яка представлена виразами (4.22)–(4.24), (4.28), (4.46)–(4.52), (4.60)–(4.65), (4.74)–(4.77), (4.80), використано структуру мережі, зображеної на рис. 4.17, для аналізу основного мультишляху та фрагмента ТКМ (рис. 4.21) для аналізу резервного мультишляху, який використовується під час захисту десятого вузла та інцидентних йому каналів зв'язку.

Так, відповідно до моделі імітаційного моделювання, яка ґрунтується на використанні пакета IxChariot (рис. 6.34), задавалися структурні та функціональні характеристики ТКМ (кількість вузлів, каналів зв'язку та їхні пропускні здатності). Тестова конфігурація для дослідження якості обслуговування згенерованого потоку відеотрафіка між вузлом-відправником та вузлом-отримувачем у використанні основного мультишляху в ТКМ (рис. 4.17) зображена на рис. 6.45.

<b>Test Configuration - Flows/Apps</b>			
Mix/Group	App/Flow	Protocol	Simulated users
FlowGroup 2	RTP MPEG2 (3.75 Mbps)	UDP	16

Рис. 6.45. Тестова конфігурація для дослідження мультимедійного трафіка вздовж основного мультишляху за допомогою IxChariot

Результати дослідження рівня якості обслуговування (MOS), що сприймається кінцевим користувачем у ТКМ під час використання основного мультишляху, наведені на рис. 6.46 та 6.47.

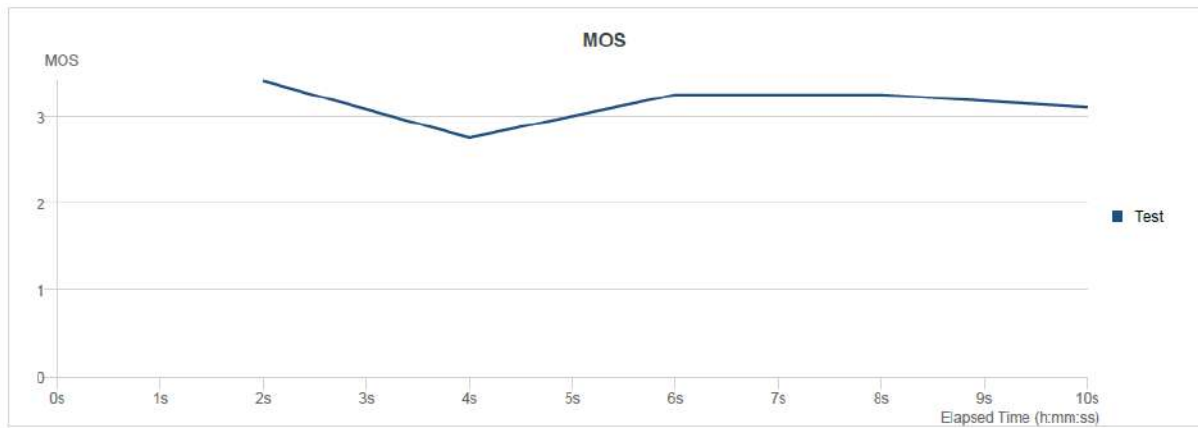


Рис. 6.46. Результати аналізу показника мультимедійної якості (MOS) під час використання основного мультишляху в ТКМ

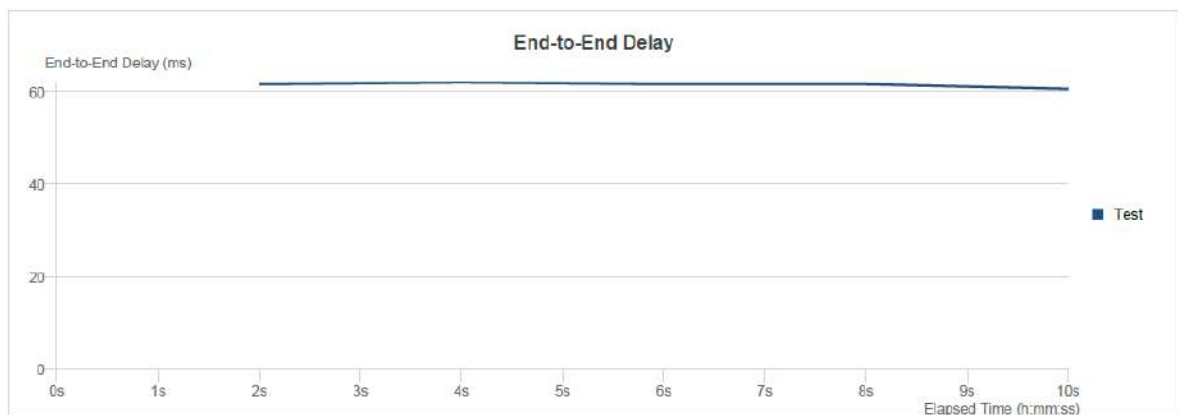


Рис. 6.47. Результати аналізу середньої міжкінцевої затримки вздовж основного мультишляху в ТКМ

Тестова конфігурація для дослідження рівня мультимедійної якості під час використання резервного мультишляху в ТКМ, фрагмент якої зображений на рис. 4.21, у процесі захисту десятого вузла (simulated user) представлена на рис. 6.48.

Test Configuration - Flows/Apps			
Mix/Group	App/Flow	Protocol	Simulated users
FlowGroup 2	RTP MPEG2 (3.75 Mbps)	UDP	15

Рис. 6.48. Тестова конфігурація для дослідження мультимедійного трафіка вздовж резервного мультишляху за допомогою IxChariot

Результати дослідження рівня якості обслуговування (MOS), що сприймається кінцевим користувачем у ТКМ під час використання резервного мультишляху, наведені на рис. 6.49 та 6.50.

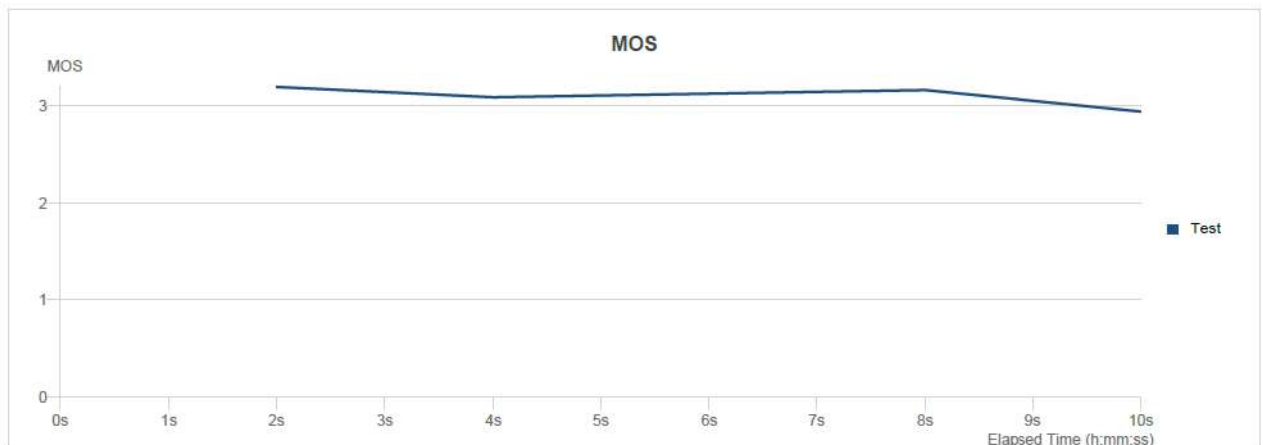


Рис. 6.49. Результати показника мультимедійної якості (MOS) уздовж резервного мультишляху в ТКМ

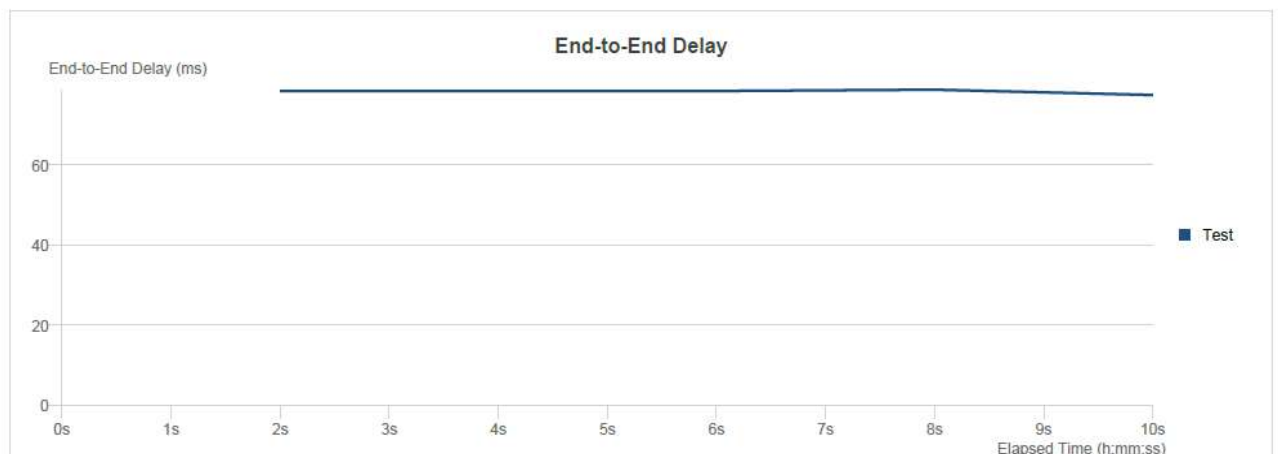


Рис. 6.50. Результати показника середньої міжкінцевої затримки уздовж резервного мультишляху в ТКМ

Результати аналізу рівня якості обслуговування відеопотоку, зображені на рис. 6.45–6.50, в узагальненій формі наведені в табл. 6.6. У цій таблиці також представлені результати аналітичних розрахунків, отримані в середовищі MatLab (табл. 4.14) з використанням тензорної моделі швидкої QoE-

перемаршрутизації із захистом рівня мультимедійної якості (4.22)–(4.24), (4.28), (4.46)–(4.52), (4.60)–(4.65), (4.74)–(4.77), (4.80).

Таблиця 6.6

**Порівняльний аналіз рішень задачі швидкої QoE-перемаршрутизації із захистом рівня мультимедійної якості, отриманих за допомогою пакетів MatLab та IxChariot**

Показники NP/QoE	У процесі використання основного мультишляху		У процесі використання резервного мультишляху	
	MatLab	IxChariot	MatLab	IxChariot
Імовірність втрат пакетів	0,001	0,002	0,009	0,011
Середня міжкінцева затримка, мс	59	61	74,5	76
Показник мультимедійної якості, <i>MMq</i>	3,5083	3,3721	3,5004	3,2319

Для наочності отримані за допомогою пакетів MatLab та IxChariot значення NP/QoE показників (табл. 6.7) зображені на рис. 6.51–6.53.

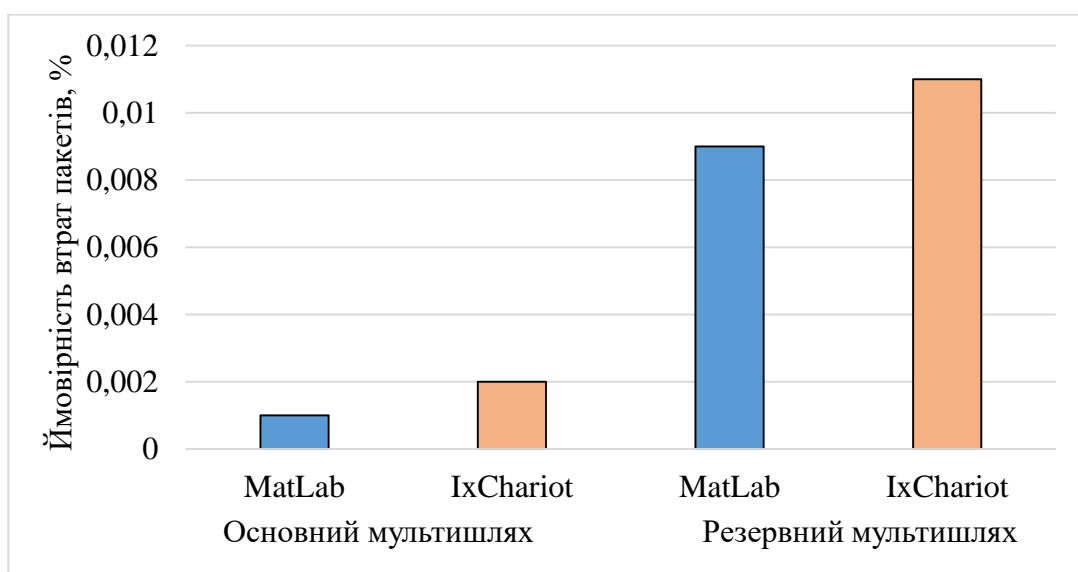


Рис. 6.51. Результати порівняльного аналізу отриманих значень імовірності втрат пакетів за допомогою пакетів MatLab та IxChariot

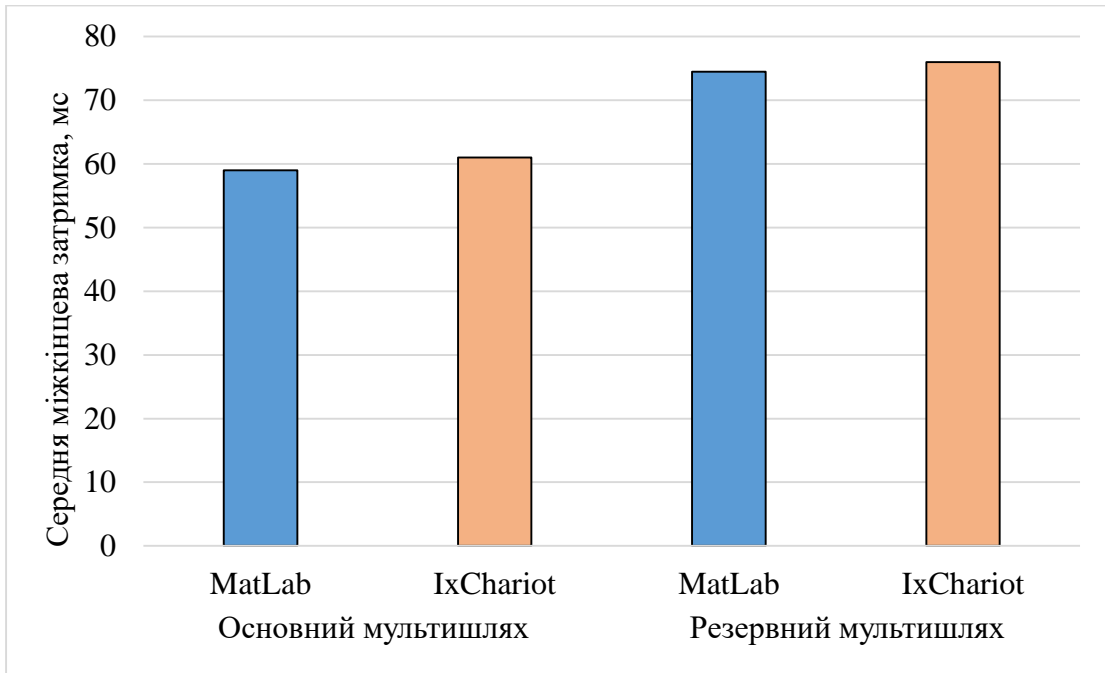


Рис. 6.52. Результати порівняльного аналізу отриманих значень середньої міжкінцевої затримки пакетів за допомогою пакетів MatLab та IxChariot

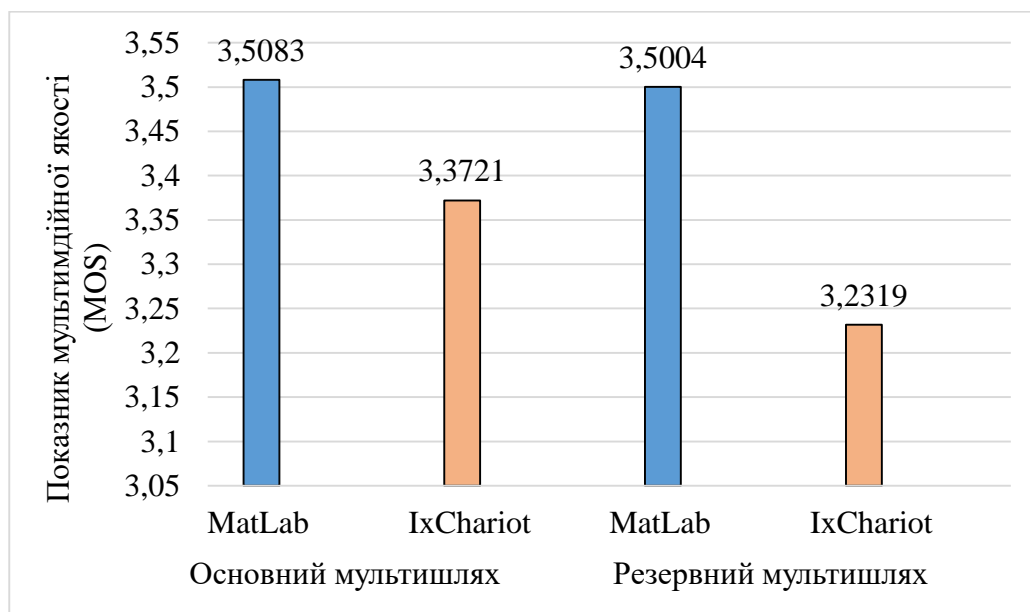


Рис. 6.53. Результати порівняльного аналізу отриманих значень показника мультимедійної якості за допомогою пакетів MatLab та IxChariot

Відповідно до отриманих результатів (табл. 6.6) можна зробити висновок про прийнятну розбіжність в аналітичних розрахунках показника мультимедійної

якості, отриманих за допомогою тензорної моделі швидкої QoE-перемаршрутизації (4.22)–(4.24), (4.28), (4.46)–(4.52), (4.60)–(4.65), (4.74)–(4.77), (4.80), та імітаційного моделювання. Вона становила 3,88 % під час аналізу основного мультишляху та 7,67 % за умови використання резервного мультишляху. До того ж розбіжність у показниках мережної продуктивності не перевищувала значень, отриманих у попередніх дослідженнях (табл. 6.2, 6.3, 6.5).

### **6.3. Рекомендації щодо практичного використання запропонованих моделей і методів відмовостійкої маршрутизації в телекомунікаційних мережах**

Реалізувати новітні теоретичні рішення щодо організації процесів маршрутизації та швидкої перемаршрутизації в ТКМ можна за двома основними напрямками. *Перший* напрям пов'язаний з оновленням наявних протоколів маршрутизації, які вже використовуються в сучасних телекомунікаційних мережах. Як правило, у результаті отримується нова версія протоколу, наприклад RIPv2 або BGPv4 [269–273]. Проте, як показує досвід, у цьому випадку модернізація стосується лише окремих технологічних аспектів того чи іншого протоколу, пов'язаних із розвитком сфери телекомунікацій, питань мережної безпеки, адресації тощо.

У випадку перегляду обчислювальних алгоритмів, які становлять основу відповідного протоколу, може дещо змінитися навіть назва та клас протоколу. Прикладом цього є заміна алгоритму Беллмана-Форда на алгоритм DUAL [180] у протоколі дистанційно-векторної маршрутизації IGRP, що визначило появу оновленого за своїм функціоналом гібридного протоколу Enhanced IGRP, який все ж зберігав основні властивості свого попередника.

*Другий* напрям реалізації перспективних теоретичних маршрутних рішень ґрунтується на створенні принципово нових протоколів або навіть технологій (архітектур) маршрутизації, у межах яких на нових ідеологічних

засадах організовується процес маршрутизації в ТКМ. Цей напрям може передбачати перегляд не тільки обчислювальних алгоритмів, але й математичних методів та безпосередньо моделей маршрутизації, що буде потребувати значного оновлення в структурі апаратного, алгоритмічного та програмного забезпечення маршрутизаторів традиційних мереж або контролерів (серверів маршрутів) програмно-конфігурованих мереж.

Наявні протоколи переважно базуються на використанні комбінаторних алгоритмів пошуку найкоротшого шляху на графі, який описує структуру ТКМ [336–338]. Тобто в процесі розрахунку маршруту враховується топологія мережі, але практично не беруться до уваги характеристики мережного трафіка, що ускладнює розв'язання задач щодо забезпечення QoS/QoE, балансування навантаження та боротьби з перевантаженням засобами маршрутизації. У таких випадках відповідальність перекладається, наприклад, на протоколи транспортного рівня або інженера, який адміністративно, переважно вручну, може налаштовувати політику QoS.

Запропоновані в цій роботі маршрутні рішення, представлені відповідними моделями та методами маршрутизації та швидкої перемаршрутизації, належать до класу потокових рішень, оскільки вони оперують з потоками пакетів, що потребує необхідність у зборі та обробленні додаткової інформації про стан мережі, про реальні (фізичні), а не логічні параметри інтерфейсів маршрутизаторів, про характеристики трафіка в ТКМ та вимоги до рівня QoS за показниками мережної продуктивності або QoE. Необхідність розв'язання досить складних оптимізаційних задач, як правило нелінійних та високої розмірності, значно підвищує вимоги як до програмного забезпечення, так і до обчислювальної потужності засобів маршрутизації (маршрутизаторів, серверів, контролерів тощо). Тобто практична реалізація запропонованих тензорних моделей та методів відмовостійкої маршрутизації безперечно пов'язана з необхідністю розроблення, тестування та впровадження нових протоколів та технологій маршрутизації.



Будь-які нові рішення щодо відмовостійкої маршрутизації можуть розглядатися кандидатами на впровадження як в традиційні транспортні мережі, що функціонують на підставі технологій IP/MPLS, так і в програмно-конфігуровані платформи, наприклад, SD-WAN (Software-Defined Networking in a Wide Area Network) [77, 92, 139]. У випадку реалізації запропонованих маршрутних рішень в IP-мережах варто врахувати, що в них реалізується так звана «hop-by-hop» (покрокова) маршрутизація, коли функції маршрутизації розподілені практично між всіма маршрутизаторами ТКМ (рис. 6.54).

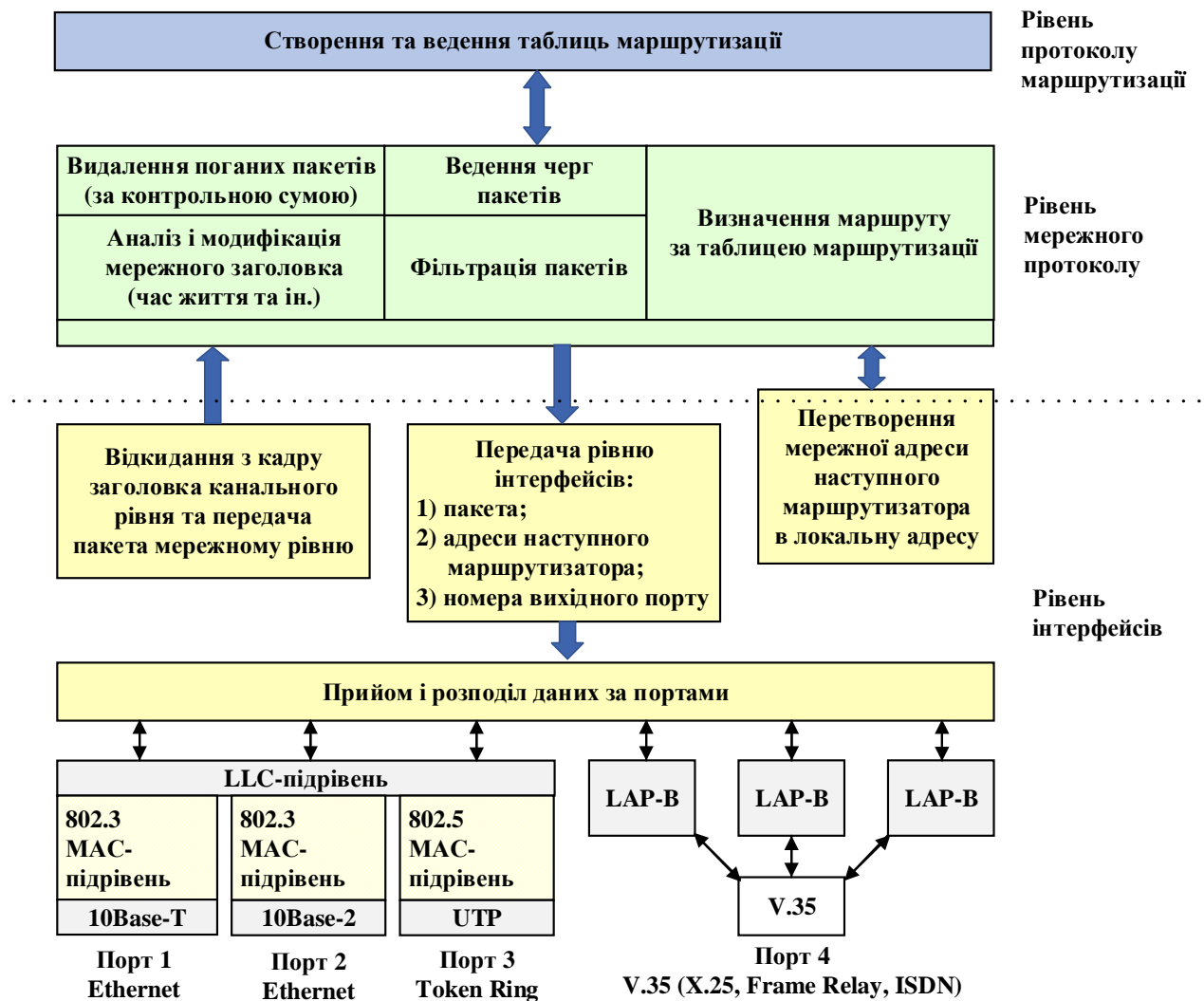


Рис. 6.54. Структурна схема IP-маршрутизатора [351]

За умови подібного способу маршрутизації загалом кінцевий шлях доставки пакетів спрогнозувати важко, а, відповідно, неможливо забезпечити QoS-гарантії в мережі. Тому в реалізації «hop-by-hop» маршрутизації

запропоновані в 2–5 розділах рішення неможливі. Упровадження рішень щодо QoS-маршрутизації в IP-мережах можливе лише за умови додаткового використання сигнальних протоколів, наприклад, протоколу RSVP, завдяки чому в мережі фактично емулюються віртуальні з'єднання.

Більш доцільно реалізувати на практиці запропоновані в роботі моделі та методи маршрутизації на рівні нового маршрутного протоколу в мережах MPLS, які належать до класу мереж пакетної комутації з віртуальними з'єднаннями. Реалізований у MPLS маршрутний протокол сумісно з сигнальним протоколом розповсюдження міток LDP (Label Distribution Protocol) реалізують маршрутизацію «від джерела», коли всі функції щодо визначення шляхів покладаються на приграничні маршрутизатори LER (Label Edge Routers) (рис. 6.55) [354–365]. Це висуває більш високі вимоги щодо їхньої надійності та обчислювальної потужності, але одночасно спрощує роботу транзитних маршрутизаторів LSR (Label Switching Router), функції яких передбачають лише просування (комутацію) пакетів за попередньо розрахованими на LER шляхами.

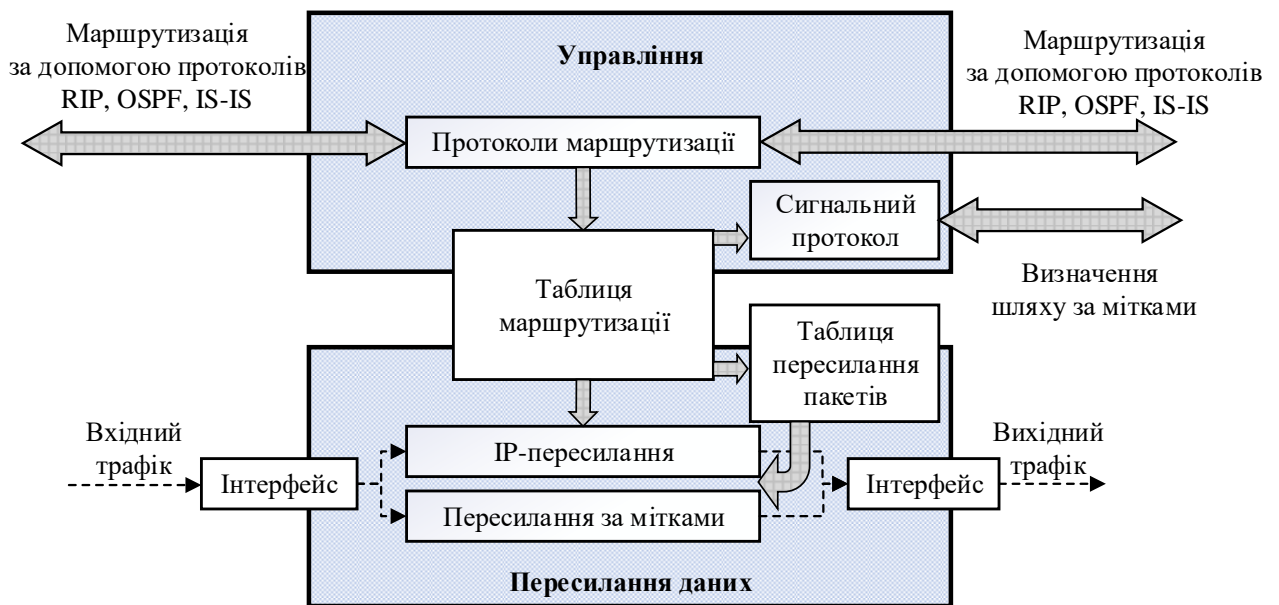


Рис. 6.55. Функціональна структура приграничного маршрутизатора MPLS [352]

Найбільш доцільно використовувати розроблені моделі та методи відмовостійкої маршрутизації саме в програмно-конфігурованих мережах, які розвивають реалізований у MPLS принцип розподілу функцій управління та комутації (просування пакетів). Тільки якщо в MPLS переважна більшість функцій управління трафіком та маршрутизації була винесена на периметр мережі, тобто на приграничні маршрутизатори, то в SD-WAN маршрутизатори майже повністю звільняються від функцій маршрутизації, які переносяться на контролери мережної операційної системи (рис. 6.56). Тому маршрутизатори транспортної мережі мають працювати за тими маршрутними таблицями, що сформовано на SDN-контролерах, розташованих у площині управління SD-WAN.

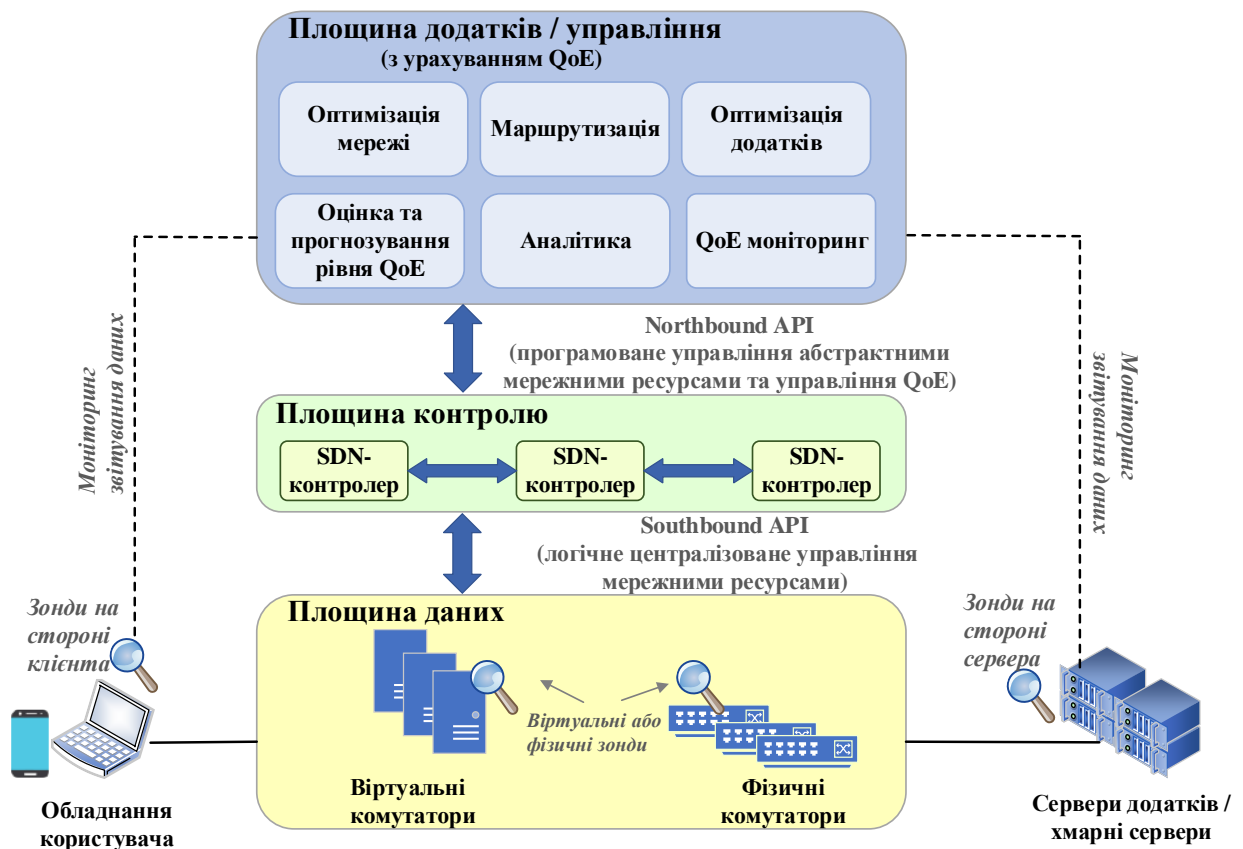


Рис. 6.56. Варіант застосування запропонованих рішень у SDN

У загальному випадку SDN-контролери, виконуючи функції серверів маршрутизації, мають обчислювальну потужність, значно вищу, ніж у

маршрутизаторів транспортної мережі. Це їм дозволило б реалізувати в реальному часі запропоновані в попередніх розділах моделі та методи відмовостійкої маршрутизації, що ґрунтуються, як зазначалося вище, на розв'язанні досить складних оптимізаційних задач нелінійного програмування. Крім того, множина функцій площини (рівня) додатків та управління (рис. 6.56) має містити задачі щодо оброблення та аналізу інформації про стан мережі (площини даних), її топології та завантаженості, а також оцінки рівня виконання вимог до показників мережної продуктивності та/або QoE. Результати розв'язання цих задач мають використовуватися для обґрунтування вибору виду та форми критерію оптимальності маршрутних рішень, застосованого на SDN-контролерах для розрахунку маршрутів.

Структура моделей та методів ієрархічної маршрутизації та швидкої QoS-перемаршрутизації в ТКМ, які запропоновані та досліджені в п'ятому розділі роботи, повністю відповідає багаторівневій архітектурі ієрархічної SD-WAN (рис. 6.57). Тут також можна виокремити два можливих випадки практичної реалізації запропонованих рішень ієрархічної маршрутизації. У випадку, коли здійснюється декомпозиція автономної системи AS (Autonomous System) на множину доменів (як, наприклад, у протоколі OSPF або IS-IS), то рекомендується така ієрархія маршрутних задач:

- функціонал нижнього рівня методу ієрархічної швидкої QoS-маршрутизації, пов'язаний з розрахунком маршрутних змінних (формуванням маршрутних таблиць) реалізується на SDN-контролерах кожного домену;
- функції координації маршрутних рішень, отриманих в окремих доменах та пов'язаних із забезпеченням зв'язності міждоменних маршрутів, а також міжкінцевої якості обслуговування за показниками пропускну здатності та середньої затримки, покладаються на SDN-контролер AS (рис. 6.57).

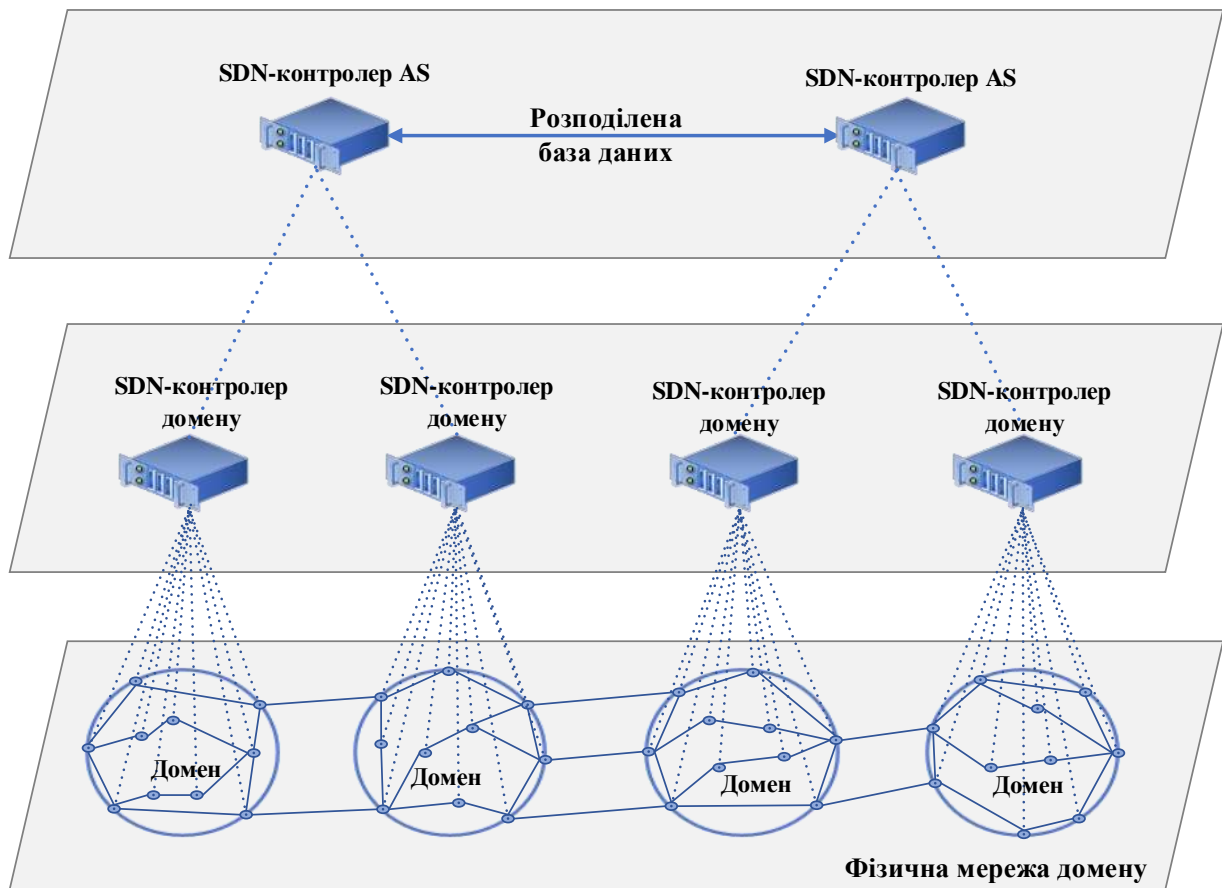


Рис. 6.57. Приклад ієрархічної (багаторівневої) архітектури SD-WAN

У другому випадку, коли в структурі автономної системи не виділяється множина доменів (як, наприклад, у використанні протоколів RIP або EIGRP), функції нижнього рівня методу ієрархічної швидкої QoS-маршрутизації покладаються на SDN-контролер AS. Функції координації маршрутних рішень, отриманих в окремих автономних системах, реалізуються SDN-контролером ТКМ загалом. Отже, можуть охоплюватися та координуватися маршрутні рішення, які належать до класу задач як протоколів внутрішнього шлюзу (IGP), так і зовнішнього шлюзу (EGP).

#### 6.4. Висновки до шостого розділу

1. Для перевірки адекватності та підтвердження ефективності запропонованих у попередніх розділах роботи тензорних математичних моделей та методів відмовостійкої маршрутизації було проведено дослідження з

використанням імітаційних моделей ТКМ, побудованих за допомогою пакетів Network Simulator 3 та IxChariot. Саме ці засоби дозволили експериментально оцінити значення основних показників якості обслуговування для різних мережних топологій та характеристик трафіка. Рівень адекватності запропонованих аналітичних рішень, отриманих з використанням пакета MATLAB, оцінювався за ступенем їхньої близькості до результатів імітаційного моделювання.

2. Результати дослідження тензорних моделей швидкої перемаршрутизації із захистом рівня якості обслуговування за показниками мережної продуктивності в ТКМ, представлених в різних геометричних базисах, з використанням пакета NS3 підтвердили її адекватність (табл. 6.2 та 6.3). Розбіжність результатів аналітичних розрахунків та імітаційного моделювання за продуктивністю ТКМ не перевищувала 7,2 %, а за середньою міжкінцевою затримкою пакетів – 5,4 %.

3. Результати дослідження тензорної моделі швидкої перемаршрутизації із захистом якості обслуговування за R-фактором, представленої виразами (2.64), (2.66), (2.71), (3.1)–(3.7), (3.11), (4.2)–(4.8), (4.13)–(4.17), (4.19), з використанням пакета IxChariot підтвердили її адекватність: розбіжність у результатах аналітичних розрахунків R-фактора та імітаційного моделювання становила 2,8 % під час аналізу основного мультишляху та 2,77 % у процесі використанні резервного мультишляху.

4. Результати дослідження тензорної моделі швидкої перемаршрутизації із захистом рівня мультимедійної якості, яка представлена виразами (4.22)–(4.24), (4.28), (4.46)–(4.52), (4.60)–(4.65), (4.74)–(4.77), (4.80), за допомогою IxChariot підтвердили її адекватність: розбіжність у результатах аналітичних розрахунків показника мультимедійної якості та імітаційного моделювання становила 3,88 % під час аналізу основного мультишляху та 7,67 % у процесі використання резервного мультишляху.

5. Сформульовано систему рекомендацій щодо практичного використання запропонованих у роботі математичних моделей та методів

відмовостійкої маршрутизації як в традиційних ТКМ, які функціонують на основі технологій IP та MPLS, так і в програмно-конфігурованих мережах, зокрема з ієрархічною архітектурою. Рекомендації стосуються необхідності збору та оброблення додаткової інформації про стан мережі, характеристики трафіка в ТКМ і про вимоги до рівня QoS за показниками мережної продуктивності або QoE. Загалом практична реалізація запропонованих тензорних моделей та методів відмовостійкої маршрутизації пов'язана з необхідністю розроблення, тестування та впровадження нових протоколів і технологій маршрутизації.

## ВИСНОВКИ ПО РОБОТІ

У дисертації вирішена актуальна науково-прикладна проблема, що полягає в розвитку теорії відмовостійкої маршрутизації чутливого до затримок і втрат трафіку в напрямку забезпечення захисту рівня якості обслуговування як за множиною показників мережної продуктивності, так і за показниками якості сприйняття користувачем. За результатами її вирішення можна зробити такі висновки.

1. Під час проведеного дослідження тенденцій розвитку телекомунікацій встановлено: рівень вимог щодо забезпечення якості обслуговування, надійності та відмовостійкості ТКМ постійно зростає, що потребує залучення до вирішення цієї важливої проблеми всіх доступних організаційних та технічних мережних засобів. Важливе місце серед подібних рішень відводиться протоколам маршрутизації, які мають забезпечувати проактивний та реактивний захист елементів ТКМ. Зі зростанням у сучасному мережному трафіку частки мультимедійних потоків, що досить чутливі до затримок та втрат пакетів, на перше місце виходять задачі щодо забезпечення якості обслуговування за множиною показників NP та QoE.

2. Результати аналізу наявних технологічних рішень та новітніх теоретичних досліджень в області відмовостійких ТКМ продемонстрували, що актуальним напрямом наукових досліджень є розвиток теорії відмовостійкої маршрутизації з розробленням відповідних математичних моделей та методів для забезпечення поряд із локальним/сегментним/глобальним захистом структурних елементів ТКМ (каналу, вузла та маршруту) також захисту рівня якості обслуговування за множиною QoS-показників уздовж основних та резервних шляхів загалом. Для оптимізації процесів відмовостійкої маршрутизації запропоновано використовувати функціонал математичного апарату тензорного аналізу мереж, за допомогою якого необхідно сформулювати в аналітичному вигляді шукані умови захисту як множини



показників мережної продуктивності, так і рівня якості обслуговування, що сприймається кінцевим користувачем.

3. Удосконалено тензорну модель телекомунікаційної мережі, яку представлено в базисі міжполюсних шляхів і внутрішніх вузлових пар. Новизною запропонованого рішення є отримання умов забезпечення якості обслуговування за показниками мережної продуктивності: пропускної здатності, середньої міжкінцевої затримки та ймовірності втрат пакетів, які, на відміну від відомих, є справедливими для різних режимів завантаженості мережі, а не тільки для режиму, близькому до перевантаження, та не потребують задіяння всіх доступних каналів зв'язку та маршрутів ТКМ. Застосування вдосконаленої тензорної моделі для розв'язання задач маршрутизації дозволяє підвищити рівень QoS, знизивши середню міжкінцеву затримку пакетів, та за необхідності забезпечити адаптивний характер використання каналів та шляхів ТКМ під час реалізації як одношляхової, так і багатошляхової маршрутизації.

4. Уперше запропоновано математичну модель швидкої перемаршрутизації трафіку даних із захистом рівня якості обслуговування за показниками пропускної здатності та ймовірності втрат пакетів у телекомунікаційній мережі. Використання моделі дозволяє реалізувати відомі схеми захисту каналу, вузла та маршруту в ТКМ із забезпеченням допустимих значень пропускної здатності та ймовірності втрат пакетів як уздовж основного, так і вздовж резервного шляху (шляхів).

5. Удосконалено систему тензорних моделей швидкої перемаршрутизації із захистом рівня якості обслуговування в ТКМ за множиною показників мережної продуктивності. Новизна запропонованих тензорних моделей полягає у формалізації умов забезпечення захисту рівня якості обслуговування за показниками мережної продуктивності: пропускної здатності, середньої міжкінцевої затримки та ймовірності втрат пакетів, що особливо важливо при маршрутизації мультимедійного трафіку. Ці умови виконувались як уздовж основних, так і резервних шляхів; та є справедливими не тільки під час

реалізації схем захисту каналів та вузлів, але й у процесі захисту маршруту (маршрутів).

6. Уперше запропоновано систему тензорних моделей маршрутизації та швидкої перемаршрутизації голосового трафіку із забезпеченням якості сприйняття послуг, що надаються кінцевим користувачам у телекомунікаційній мережі за R-фактором, у процесі реалізації схем захисту каналів, вузлів та маршруту (маршрутів). Використання тензорного підходу дозволило забезпечити заданий рівень QoE шляхом контролю за значеннями середньої міжкінцевої затримки та ймовірності втрат пакетів як уздовж основного, так і резервного шляху (шляхів) мережі.

7. Уперше запропоновано систему тензорних моделей маршрутизації та швидкої перемаршрутизації мультимедійного трафіку із забезпеченням якості сприйняття послуг, що надаються кінцевим користувачам у телекомунікаційній мережі за показником мультимедійної якості, під час реалізації схем захисту каналів, вузлів і маршруту (маршрутів). Використання тензорного підходу дозволило забезпечити заданий рівень QoE шляхом синхронного контролю в межах однієї мультимедійної сесії значень середньої міжкінцевої затримки та ймовірності втрат для голосового та відеопотоків пакетів як уздовж основного, так і резервного шляху (шляхів) у мережі.

8. Отримала подальший розвиток декомпозиційна модель міждоменної маршрутизації із забезпеченням якості обслуговування в телекомунікаційній мережі, яка складається з множини послідовно з'єднаних доменів. Новизною запропонованої моделі маршрутизації є модифікація умов збереження потоку, що дозволило сформулювати умови забезпечення міжкінцевої якості обслуговування в мультидоменних телекомунікаційних мережах за показниками пропускної здатності та середньої міжкінцевої затримки пакетів.

9. Подальшого розвитку набули методи ієрархічно-координаційної маршрутизації в мультидоменних телекомунікаційних мережах. Новизною першого методу є забезпечення нормованої за доменами середньої міжкінцевої затримки пакетів, коли виконання нормованих вимог щодо якості

обслуговування забезпечується в кожному домені окремо, а координація маршрутних рішень здійснюється за умовами міждоменної взаємодії. Новизна другого методу полягає в тому, що координація маршрутних рішень здійснюється як за умовами міждоменної взаємодії, так і за умовами забезпечення наскрізної середньої затримки пакетів у ТКМ загалом.

10. Отримав подальший розвиток метод ієрархічно-координаційної відмовостійкої маршрутизації в мультидоменних телекомунікаційних мережах. Новизною методу є забезпечення захисту рівня якості обслуговування в мультидоменних ТКМ за показниками пропускної здатності та середньої міжкінцевої затримки пакетів під час резервування (захисту) міждоменних маршрутизаторів у процесі розрахунку основних і резервних шляхів, що дозволило підвищити масштабованість та відмовостійкість маршрутних рішень.

11. Застосування запропонованих рішень дозволяє покращити рівень якості обслуговування в мережі. Порівняно з математичними моделями, основаними на маршрутних метриках, виграш у значеннях середньої міжкінцевої затримки пакетів становив від 6–12 % до 18–30 %; порівняно з рішеннями Traffic Engineering – від 5–8 % до 21,5–24 %. Залежно від завантаженості мережі виграш щодо значень R-фактора становив у середньому від 12 до 25 %. Виграш щодо рівня мультимедійної якості вдалося забезпечити в середньому на 16–26 %.

12. Результати дослідження запропонованих тензорних моделей швидкої перемаршрутизації із захистом рівня якості обслуговування за показниками мережної продуктивності та QoE в ТКМ, представлених в різних геометричних базисах, підтвердили її адекватність. Розбіжність результатів аналітичних розрахунків, отриманих за допомогою середовища MATLAB та імітаційного моделювання з використанням пакетів NS3 та IxChariot, не перевищувала 5–8%.

13. Отримані в дисертаційній роботі результати були використані в навчальному процесі та під час виконання науково-дослідних робіт у ХНУРЕ, а також на підприємстві «ХДРНТЦ ТЗІ», у ТОВ «Воркнест» та ПрАТ «Фарлеп-Інвест», про що складені відповідні акти впровадження (додаток А).

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Blokdyk G. Software-Defined Networking SDN production, 1st edition. 5STARCOOKS, 2019. 238 p.
2. Rak J. Resilient Routing in Communication Networks (Computer Communications and Networks), 1st edition. Springer, 2015. 181 p.
3. Barreiros M., Lundqvist P. QOS-Enabled Networks: Tools and Foundations, 2nd edition. Wiley Series on Communications Networking & Distributed Systems, Wiley, 2016. 254 p.
4. Vidal I., Soto I., Banchs A., Garcia-Reinoso J., Lozano I., Camarillo G. Multimedia Networking Technologies, Protocols, & Architectures (Artech House Communications and Network Engineering), 1st edition. Artech House, 2019. 300 p.
5. Liu Y., Niu D., and Li B. Delay-Optimized Video Traffic Routing in Software-Defined Inter datacenter Networks. *IEEE Trans. Multimedia*. 2016. Vol. 18, No. 5. P. 865–878.
6. Wang W., Tian Y., Gong X., Qi Q., Hu Y. Software Defined autonomic QoS model for Future internet. *Journal of Systems and Software*. 2015. Vol. 110. P. 122–135. DOI: 10.1016/j.jss.2015.08.016.
7. Gouareb R., Friderikos V., Aghvami A. H. Delay Sensitive Virtual Network Function Placement and Routing. *Telecommunications (ICT) 2018: Proceedings of the 25th International Conference*, St. Malo, 2018. IEEE, 2018. P. 394–398. DOI: 10.1109/ICT.2018.8464883.
8. Wang Q., Shou G., Liu Y., Hu Y., Guo Z., Chang W. Implementation of Multipath Network Virtualization with SDN and NFV. *IEEE Access*. 2018. Vol. 6. P. 32460–32470. DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2842058.
9. Ioffrida J. I. SDN and NFV: Essentials, 1st edition. Independently, 2020. 79 p.
10. Stallings W. Foundations of Modern Networking: SDN, NFV, QoE, IoT, and Cloud, 1st edition. Pearson Education Inc., 2016. 510 p.
11. Rak J., Hutchison D. Guide to Disaster-Resilient Communication Networks (Computer Communications and Networks), 1st edition. Springer, 2020. 834 p.

12. Alenazi M. J., Çetinkaya E. K. Resilient placement of SDN controllers exploiting disjoint paths. *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*. 2019. Vol. 31. P. 1–17. DOI: 10.1002/ett.3725
13. Yu Y. *et al.* Fault Management in Software-Defined Networking: A Survey. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. First quarter 2019. Vol. 21, No. 1. P. 349–392. DOI: 10.1109/COMST.2018.2868922.
14. Muthumanikandan V., Valliyammai C. Link Failure Recovery Using Shortest Path Fast Rerouting Technique in SDN. *Wireless Personal Communications*. 2017. Vol. 97, No. 2. P. 2475–2495. DOI: 10.1007/s11277-017-4618-0.
15. Nada A., Niemah O., Mkwawa I. H. Quality of Protection and Quality of Experience in Multimedia Communications. *International Journal of Computing & Information Sciences*. September 2016. Vol. 12, No. 1. P. 95–104 DOI: 10.21700/ijcis.2016.113
16. Nweke L. O., Wolthusen S. D. Resilience Analysis of Software-Defined Networks Using Queueing Networks. *Computing, Networking and Communications (ICNC) Proceedings of the International Conference, Big Island, HI, USA, 2020*. IEEE, 2020. P. 536–542, DOI: 10.1109/ICNC47757.2020.9049712.
17. Monge A. S., Szarkowicz K. G. *MPLS in the SDN Era: Interoperable Scenarios to Make Networks Scale to New Services*, 1st edition. O'Reilly Media, 2016. 920 p.
18. White R., Banks E. *Computer Networking Problems and Solutions: An innovative approach to building resilient, modern networks*, 1st edition. Addison-Wesley Professional, 2018. 1369 p.
19. Donovan J., Prabhu K. *Building the Network of the Future: Getting Smarter, Faster, and More Flexible with a Software Centric Approach (Paperback)*, 1st edition. Routledge, 2020. 440 p.
20. Hasan H., Cosmas J., Zaharis Z., Lazaridis P., Khwandah S. Development of FRR mechanism by adopting SDN notion. *Software, Telecommunications and Computer Networks (SoftCOM): Proceedings of the 24th International Conference, Split, 2016*, P. 1–7, DOI: 10.1109/SOFTCOM.2016.7772133.

21. Moyeen M. A., Tang F., Saha D., Haque I. SD-FAST: A Packet Rerouting Architecture in SDN. *Network and Service Management (CNSM)*: Proceedings of the 15th International Conference, Halifax, NS, Canada, 2019. P. 1–7, DOI: 10.23919/CNSM46954.2019.9012703.
22. Fonseca P. C., Mota E. S. A Survey on Fault Management in Software-Defined Networks. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. Fourth quarter. 2017. Vol. 19, No. 4. P. 2284–2321. DOI: 10.1109/COMST.2017.2719862.
23. Shu, Z., Wan, J., Lin, J., Wang, S., Li, D., Rho, S., Yang, C. Traffic engineering in software-defined networking: Measurement and management. *IEEE Access*. 2016. Vol. 4. P. 3246–3256. DOI: 10.1109/access.2016.2582748
24. Mendiola A., Astorga J., Jacob E., Higuero M. A survey on the contributions of Software-Defined Networking to Traffic Engineering. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. Second quarter. 2017. Vol. 19, Issue 2. P. 918–953.
25. Albalawi A. A., Garcia-Luna-Aceves J.J. A Delay-Based Congestion-Control Protocol for Information-Centric Networks. Computing, Networking and Communications (ICNC): Proceedings of the International Conference, Honolulu, HI, USA, 2019. P. 809–815. DOI: 10.1109/ICCNC.2019.8685491
26. Tipper D. Resilient network design: challenges and future directions. *Telecommunication Systems*. 2014. Vol. 56, No. 1. P. 5–16. DOI: 10.1007/s11235-013-9815-x.
27. Gomes T., Santos D. Girão-Silva R., Martins L., Nedic B., Gunkel M., Vass B., Tapolcai J., Rak J. Disaster-Resilient Routing Schemes for Regional Failures. *Computer Communications and Networks*. 2020. P. 483–506. DOI: 10.1007/978-3-030-44685-7\_19.
28. Gomes T., Martins L., Ferreira S., Pascoal M., Tipper D. Algorithms for determining a node-disjoint path pair visiting specified nodes. *Optical Switching and Networking*. 2017. Vol. 23. P. 189–204. DOI: 10.1016/j.osn.2016.05.002.
29. Martins L., Gomes T., Tipper D. An efficient heuristic for calculating a protected path with specified nodes. *Resilient Networks Design and Modeling*

(*RNDM*): Proceedings of the 8th International Workshop, Halmstad, Sweden, 13–15 September, 2016. IEEE, 2016. P. 150-157. DOI: 10.1109/RNDM.2016.7608281.

30. Mauthe A., Hutchison D., Cetinkaya E. K., Ganchev I., Rak J., Sterbenz J. P., Gunkelk M., Smith P., Gomes T. Disaster-resilient communication networks: Principles and best practices. *Resilient Networks Design and Modeling (RNDM): Proceedings of the 8th International Workshop*. Halmstad, Sweden, 13-15 September, 2016. IEEE, 2016. P. 1–10. DOI: 10.1109/RNDM.2016.7608262.

31. Rak J., Papadimitriou D., Niedermayer H., Romero P. Information-driven network resilience: Research challenges and perspectives. *Optical Switching and Networking*. 2017. Vol. 23, Part 2. P. 156–178. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.osn.2016.06.002>.

32. Myslitski K., Rak J., Kuszner Ł. Toward fast calculation of communication paths for resilient routing. *Networks*. 2017. Vol. 70, No. 4. P. 308–326. DOI: 10.1002/net.21789.

33. Tapolcai J., Rónyai L., Vass B., Gyimóthi L. Fast Enumeration of Regional Link Failures Caused by Disasters with Limited Size. *IEEE/ACM Transactions on Networking*. 2020. P. 1–14. DOI: 10.1109/TNET.2020.3009297.

34. Rak J., Hutchison D., Tapolcai J., Bruzgiene R., Tornatore M., Mas-Machuca C., Furdek M., Smith P. Fundamentals of Communication Networks Resilience to Disasters and Massive Disruptions. *Computer Communications and Networks*. 2020. P. 1–43. DOI: 10.1007/978-3-030-44685-7\_1.

35. Телекомунікаційні системи та мережі. Структура та основні функції [Електронний ресурс] / В. В. Поповський та ін. Т. 1. Харків: СМІТ, 2011. Режим доступу: <http://www.znanius.com/3534.html>.

36. Багатоканальний електрозв'язок та телекомунікаційні технології: Підручник (Гриф МОН України №1/10-8465 від 10.09.2010)) У 2-х ч. Ч. 1 / О. В. Лемешко, В. В. Поповський, В. А. Лошаков та ін., за ред. В. В. Поповського. Харків: ТОВ "Компанія СМІТ", 2010. 470 с.

37. Багатоканальний електрозв'язок та телекомунікаційні технології: підручник у 2-х частинах. Ч.2 / О. В. Лемешко, В. А. Лошаков, В. В.

Поповський та ін.; за заг. ред. проф. Поповського В. В. Харків: ТОВ "Компанія СМІТ", 2010. 482 с.

38. Методи наукових досліджень в телекомунікаціях. У 2-х томах. Т. 1: навчальний посібник / під ред. В. В. Поповського. Харків: Компанія СМІТ, 2013. 390 с.

39. Методи наукових досліджень в телекомунікаціях. У 2-х томах. Т. 2: навчальний посібник / під ред. В. В. Поповського. Харків: Компанія СМІТ, 2013. 330 с.

40. Математичні основи теорії телекомунікаційних систем / В. В. Поповський, С. О. Сабурова, В. Ф. Олійник, Ю. І. Лосєв, Д. В. Агеєв та ін.: За загал. ред. В. В. Поповського. Харків: ТОВ «Компанія СМІТ», 2006. 564 с.

41. Системи електрозв'язку та сигнали: навчальний посібник / під ред. Л. Н. Беркман, Л. О. Комарова, Н. С. Чумак. Київ, 2015. 132 с.

42. Беркман Л. Н., Вишнівський В. В. Розробка інформаційної технології для синтезу високоефективних систем технічного діагностування інформаційних систем. *Системи управління, навігації та зв'язку*. 2015. Вип. 4. С. 52–54. Режим доступу: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/suntz\\_2015\\_4\\_13](http://nbuv.gov.ua/UJRN/suntz_2015_4_13).

43. Воробієнко П. П., Гранатуров В. М. Державне регулювання розвитку телекомунікаційної сфери України. *Економіка України*. 2012. № 10. С. 45–53. . Режим доступу: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/EkUk\\_2012\\_10\\_5](http://nbuv.gov.ua/UJRN/EkUk_2012_10_5).

44. Телекомунікаційні та інформаційні мережі: Підручник [для вищих навчальних закладів] / П.П. Воробієнко, Л.А. Нікітюк, П.І. Резніченко. К.: САММІТ-Книга, 2010. 708 с.

45. Цикалевич О.М., Воробієнко П.П. Мережі передачі даних та засоби захисту інформації. *Інфокомунікації – сучасність та майбутнє*: матеріали 7-ої Міжнар. наук-практ. конференції, Одеса: ОНАЗ ім. О.С. Попова, 2017. С. 134–135.

46. Стрелковская И. В., Соловская И. Н. Тензорные методы моделирования трафика в телекоммуникационных сетях. Dusseldorf: LAP Lambert Academic Publishing. 2017. 280 p.



47. Стрелковська І. В., Соловська І. М. Маршрутизація в мережі MPLS-TE з додатковими напрямками передавання трафіку. *Зв'язок*. 2015. № 1. С. 25-30.

48. Strelkovskaya I. V., Grygoryeva T. I., Solovskaya I. N. Self-similar traffic in G/M/1 queue defined by the Weibull distribution. *Radioelectronics and Communications Systems*. March 2018. Vol. 61, No. 3. P. 173–180. DOI: <https://doi.org/10.20535/S0021347018030056>.

49. Чевардін В. Є., Романюк В. А., Шевченко В. С. Модель загроз безпеки інформації в сучасних телекомунікаційних мережах з динамічною топологією. *Збірник наукових праць ВІТІ НТУУ «КПІ»*. 2012. №2. С. 90–95.

50. Климаш М. М., Кайдан М. В., Стрихалюк Б. М. Тензорна модель телекомунікаційної мережі на основі криволінійної системи координат. *Телекомунікаційні та інформаційні технології*. 2016. № 3. С. 14–21.

51. Волочій Б. Ю., Озірковський Л. Д., Чопей Р. С., Мащак А. В., Шкілюк О. П. Оцінка надійності програмно-апаратних систем за допомогою моделі їх поведінки. *Вісник Національного університету “Львівська Політехніка”*. 2014. № 796. С. 222-231

52. Лемешко О. В., Євсєєва О. Ю. Конспект лекцій з дисципліни «Алгоритми управління та адаптації в ТКС» для студентів денної форми навчання спеціальності 7.092401 – Телекомунікаційні системи та мережі. Харків: ХНУРЕ, 2008. 164 с.

53. Лемешко А. В., Евсеева О. Ю. Тензорная модель многопутевой маршрутизации с гарантиями качества обслуживания одновременно по множеству разнородных показателей. *Проблеми телекомунікацій*. 2012. № 4(9). С. 16–31. Режим доступу: [http://pt.nure.ua/wp-content/uploads/2020/01/124\\_lemeshko\\_tensor.pdf](http://pt.nure.ua/wp-content/uploads/2020/01/124_lemeshko_tensor.pdf).

54. Лемешко А. В. Тензорная модель многопутевой маршрутизации агрегированных потоков с резервированием сетевых ресурсов, представленная в пространстве с кривизной. *Праці УНДІРТ*. 2004. №4(40). С. 12-18.

55. Lemeshko A. V., Evseeva O. Yu., Garkusha S. V. Research on Tensor Model of Multipath Routing in Telecommunication Network with Support of Service

Quality by Greater Number of Indices. *Telecommunications and Radio Engineering*. 2014. Vol. 73, No. 15. P. 1339–1360. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v73.i15.30.

56. Lemeshko O. V., Yevseyeva O. Yu., Garkusha S. V. A Tensor Model of Multipath Routing Based on Multiple QoS Metrics. *Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON) 2013: Proceedings of the International Conference*. Krasnoyarsk, Russia, 12–13 September, 2013. IEEE, 2013. P. 1–4. DOI: 10.1109/SIBCON.2013.6693645.

57. Єременко О. С. Тензорна модель відмовостійкої маршрутизації з підтримкою якості обслуговування в мультисервісній телекомунікаційній мережі. *Проблеми телекомунікацій*. 2017. № 2 (21). С. 16–31. URL: [http://pt.nure.ua/wp-content/uploads/2020/01/172\\_yeremenko\\_qosfr.pdf](http://pt.nure.ua/wp-content/uploads/2020/01/172_yeremenko_qosfr.pdf).

58. Лемешко А. В., Дробот О. А. Модель многопутевой QoS-маршрутизации в мультисервисной телекоммуникационной сети. *Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб.* 2006. №144. С. 16–22.

59. Кулаков Ю. О., Диброва М. А., Коган А. В. Формирование множества непересекающихся путей между граничными маршрутизаторами сети MPLS. *Electronics and Communications (Електроніка та зв'язок)*. 2016. Том 21, №1(90). С. 50–55.

60. Лемешко О. В., Єременко О. С. Розробка та дослідження лінійної оптимізаційної моделі швидкої перемаршрутизації з балансуванням навантаження в телекомунікаційних мережах. *Радиоэлектроника и информатика*. 2017. № 4 (79). С. 18–25.

61. Єременко А. С. Двухуровневый метод иерархическо-координационной QoS-маршрутизации на основе резервирования ресурсов. *Радиотехника*. 2018. Вып. 192. С. 71–83.

62. Lemeshko O. V., Arous K. M., Yeremenko O. S. Fault-Tolerant Unicast, Multicast and Broadcast Routing Flow-based Models. *Scholars Journal of Engineering and Technology (SJET)*. 2015. Vol. 3, Issue 4A. P. 343–350.

63. Гаркуша С. В., Гаркуша Е. В., Еременко А. С. Модель распределения подканалов в беспроводной Mesh-сети стандарта IEEE 802.16, представленной в виде гиперграфа. *Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил*. 2015. Вип. 2 (43). С. 32–38.

64. Крон Г. Исследование сложных систем по частям (диакоптика). Москва: Наука, 1972. 544 с.

65. Крон Г. Тензорный анализ сетей. Москва: Сов. радио, 1978. 720 с.

66. Еременко А. С., Тарики Н., Евдокименко М. А. Оптимизационная модель отказоустойчивой маршрутизации с билинейными условиями защиты пути. *Радиоэлектроника и информатика*. 2017. №2. С. 9–14.

67. Євдокименко М. О., Кравченко Б. Д., Лукова-Чуйко Н. В. Аналіз проблеми забезпечення ефективного балансування навантаження в мережах MPLS-TE. *Проблеми телекомунікацій*. 2017. № 2 (21). С. 32–41. URL: [http://pt.nure.ua/wp-content/uploads/2020/01/172\\_yevdokymenko\\_balancing.pdf](http://pt.nure.ua/wp-content/uploads/2020/01/172_yevdokymenko_balancing.pdf).

68. Lemeshko O., Yevdokymenko M., Naors Y. Anad Alsaleem. Development of the tensor model of multipath QoE-routing in an infocommunication network with providing the required Quality Rating. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. Vol. 5, Issue 2 (95). P. 40–46. DOI: 10.15587/1729-4061.2018.141989.

69. Єременко О. С., Євдокименко М. О. Огляд теоретичних рішень щодо відмовостійкої маршрутизації в телекомунікаційних мережах. *Проблеми телекомунікацій*. 2018. № 1 (22). С. 25–42. DOI: 10.30837/pt.2018.1.02. URL: [http://pt.nure.ua/wp-content/uploads/2020/01/181\\_yeremenko\\_resilience.pdf](http://pt.nure.ua/wp-content/uploads/2020/01/181_yeremenko_resilience.pdf)

70. Lemeshko O., Nevzorova O., Ilyashenko A., Yevdokymenko M. Hierarchical Coordination Method of Inter-Area Routing in Backboneless Network. *Advances in Computer Science for Engineering and Education II. ICCSEEA 2019. Advances in Intelligent Systems and Computing*, Springer, Cham. 2019. Vol. 938. P. 90–102. DOI: 10.1007/978-3-030-16621-2\_9

71. Lemeshko O., Yeremenko O., Yevdokymenko M. MPLS Traffic Engineering Solution of Multipath Fast ReRoute with Local and Bandwidth Protection. *Advances in Computer Science for Engineering and Education II. ICCSEEA 2019. Advances in Intelligent Systems and Computing*, Springer, Cham. 2019. Vol. 938. P. 113–125. DOI: 10.1007/978-3-030-16621-2\_11.

72. Невзорова О. С., Євдокименко М. О. Особливості реалізації дворівневого методу маршрутизації на контролері з багатоядерною архітектурою в програмно-конфігурованій мережі. *Проблеми телекомунікацій*. 2018. № 2 (23). С. 75–88. DOI: 10.30837/pt.2018.2.06. URL: [http://pt.nure.ua/wp-content/uploads/2020/01/182\\_nevzorova\\_multicore.pdf](http://pt.nure.ua/wp-content/uploads/2020/01/182_nevzorova_multicore.pdf)

73. Harkusha S., Lemeshko O., Yevdokymenko M., Yeremenko O. Model of structurally functional selforganization of multi-radio multi-channel mesh networks using hypergraphs. *Workshop Proceedings of the 8th International Conference on “Mathematics. Information Technologies. Education”*, MoMLeT&DS-2019, Shatsk, Ukraine. 2019. Vol. 2386. P. 75–84. URL: <http://ceur-ws.org/Vol-2386/paper6.pdf>.

74. Євдокименко М. О., Шаповалова А. С. Метод оцінювання впливу атак на інфокомунікаційну мережу з урахуванням наявних вразливостей. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського*. 2018. Т.29 (68), № 4. С. 67–72. URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/sntuts\\_2018\\_29%2868%29\\_4%281%29\\_\\_14](http://nbuv.gov.ua/UJRN/sntuts_2018_29%2868%29_4%281%29__14).

75. Kuzminykh I., Carlsson A., Yevdokymenko M., Sokolov V. Investigation of the IoT device lifetime with secure data transmission // In: Galinina O., Andreev S., Balandin S., Koucheryavy Y. (eds) *Internet of Things, Smart Spaces, and Next Generation Networks and Systems. NEW2AN 2019, ruSMART 2019. Lecture Notes in Computer Science*, Springer, Cham. Vol. 11660. P 16–27. DOI: 10.1007/978-3-030-30859-9\_2.

76. Yevdokymenko M. O., Shapovalova A. S., Nevzorova O. S. Proactive Approach for Security of the PAAS Model of Cloud System Based on Vulnerability

Assessment. *International Journal of Science and Engineering Investigations*. 2019. Vol. 8(91), P. 167–173. URL: <http://www.ijsei.com/papers/ijsei-89119-22.pdf>.

77. Лемешко О. В., Шаповалова А. С., Єременко О. С., Євдокименко М. О., Хайлан А. М. Математична модель швидкої перемаршрутизації з балансуванням навантаження та диференційованого обмеження трафіка в мережах SD-WAN. *Системи управління, навігації та зв'язку*. 2019. №4 (56). С. 63–71. DOI:10.26906/SUNZ.2019.4.063.

78. Lemeshko O., Yevdokymenko M., Yeremenko O. Model of data traffic QoS fast rerouting in infocommunication networks. *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*. 2019. № 3 (9), P. 127–134. DOI: 10.30837/2522-9818.2019.9.127.

79. Євдокименко М. О. Метод ієрархічно-координаційної міждоменної маршрутизації у програмно-конфігурованій інфокомунікаційній мережі із забезпеченням нормованої якості обслуговування. *Проблеми телекомунікацій*. 2019. №. 2 (25). С. 3–26. DOI: 10.30837/pt.2019.2.01

80. Lemeshko O., Yeremenko O., Sleiman B., Yevdokymenko M. Fast ReRoute Model with Realization of Path and Bandwidth Protection Scheme in SDN. *Advances in Electrical and Electronic Engineering*. 2020. Vol. 18, № 1. P. 23–30. DOI: 10.15598/aeer.v18i1.3548.

81. Lemeshko O., Yevdokymenko M., Hu Z., Yeremenko O. Inter-domain routing method under normalized Quality of Service based on hierarchical coordination. *Ceur Workshop Proceedings of the International Workshop on Computer Modeling and Intelligent Systems (CMIS), Zaporizhzhya, ZNTU*. 2020. Vol. 2608. P. 394–408. URL: <http://ceur-ws.org/Vol-2608/paper30.pdf>.

82. Лемешко О. В., Євдокименко М. О. Вдосконалення потокової моделі маршрутизації в мультисервісній телекомунікаційній мережі із забезпеченням якості обслуговування. *Системи озброєння і військова техніка*. 2020. № 1(61). С. 31–43. DOI: 10.30748/soivt.2020.61.04

83. Лемешко О. В., Євдокименко М. О., Єременко О. С. Оптимізаційна модель маршрутизації чутливого до затримок трафіка в інфокомунікаційних мережах. *Збірник наукових праць «Системи управління, навігації та зв'язку»*. 2020. Т. 2 (60). С. 152–159. DOI:10.26906/SUNZ.2020.2.152

84. Лемешко О. В., Євдокименко М. О. Метод ієрархічної міждоменної маршрутизації у програмно-конфігурованій телекомунікаційній мережі із забезпеченням міжкінцевої якості обслуговування. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2020. №2(12). С. 169–182. DOI: 10.30837/2522-9818.2020.12.169

85. Lemeshko O., Yevdokymenko M. Advanced tensor approach to fast reroute with quality of service protection under multiple parameters. *Information and Telecommunication Sciences*. 2020. №1. P. 41–52. DOI: 10.20535/2411-2976.12020.41-52

86. Lemeshko O., Yevdokymenko M., Yeremenko O. Fast ReRoute Tensor Model with Quality of Service Protection Under Multiple Parameters. In: Radivilova T., Ageyev D., Kryvinska N. (eds) *Data-Centric Business and Applications. Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies*, Springer, Cham. 2020. Vol. 48. P. 489–512. DOI: 10.1007/978-3-030-43070-2\_22.

87. Harkusha S., Yevdokymenko M. The Development of Routing Flow Model in IEEE 802.11 Multi-radio Multi-channel Mesh Networks, Shown as a Konig Graph. In: Radivilova T., Ageyev D., Kryvinska N. (eds) *Data-Centric Business and Applications. Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies*, Springer, Cham. 2020. Vol. 48. P. 513–528. DOI: 10.1007/978-3-030-43070-2\_23.

88. Yevdokymenko M. Enhancement of the adaptive routing tensor model in the infocommunication network with providing quality of experience by the R-factor. *Technology Audit and Production Reserves*. 2020. Vol 3, № 2(53). P. 15–22. DOI: 10.15587/2312-8372.2020.20603123.

89. Yevdokymenko M. Investigation of Tensor Approach for Providing Multimedia Quality in Infocommunication Networks. Ceur Workshop Proceedings of the International Workshop on Cyber Hygiene (CybHyg-2019) co-located with 1st International Conference on Cyber Hygiene and Conflict Management in Global Information Networks (CyberConf 2019). 2019. Vol. 2654, P. 227–239. URL: <http://ceur-ws.org/Vol-2654/paper18.pdf>.

90. Lemeshko O., Yevdokymenko M., Yeremenko O., Shapovalova A. Investigation of Load-Balancing Fast ReRouting Model with Providing Fair Priority-Based Traffic Policing. In: Hu Z., Petoukhov S., Dychka I., He M. (eds) Advances in Computer Science for Engineering and Education III. ICCSEEA 2020. Advances in Intelligent Systems and Computing. Springer, Cham. 2020. Vol. 1247. P. 108–119 DOI: 10.1007/978-3-030-55506-1\_10.

91. Lemeshko O., Yeremenko O., Yevdokymenko M., Hailan A. M. Tensor Multiflow Routing Model to Ensure the Guaranteed Quality of Service Based on Load Balancing in Network. In: Hu Z., Petoukhov S., Dychka I., He M. (eds) Advances in Computer Science for Engineering and Education III. ICCSEEA 2020. Advances in Intelligent Systems and Computing. Springer, Cham. 2020. Vol. 1247. P. 120–131. DOI: 10.1007/978-3-030-55506-1\_11.

92. Lemeshko O., Yeremenko O., Hailan A.M., Yevdokymenko M., Shapovalova A. Policing Based Traffic Engineering Fast ReRoute in SD-WAN Architectures: Approach Development and Investigation. In: Al-Bakry A. et al. (eds) New Trends in Information and Communications Technology Applications. NTICT 2020. Communications in Computer and Information Science. Springer, Cham. Vol. 1183. P. 29–43. DOI: 10.1007/978-3-030-55340-1\_3.

93. Єременко О. С., Євдокименко М. О., Слейман Б. Удосконалена модель швидкої перемаршрутизації з реалізацією схеми захисту шляху та пропускної здатності в програмно-конфігурованих мережах. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2020. № 1 (11). С. 163–171. DOI: 10.30837/2522-9818.2020.11.163.

94. Harkusha S., Harkusha O., Ievdokymenko M. Hypergraph representations of topological model mesh-network IEEE 802.11. *Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science (TCSET)*: Proceedings of the 13th International Conference. Lviv, 2016. IEEE, 2016. P. 876–878, DOI: 10.1109/TCSET.2016.7452212.

95. Yevdokymenko M. An adaptive algorithm for detecting and preventing attacks in telecommunication networks. *Problems of Infocommunications Science and Technology (PIC S&T)*: Proceedings of the Third International Scientific-Practical Conference, Kharkiv, Ukraine, 4–6 Oct. 2016. IEEE, 2016. P. 175–177. DOI: 10.1109/INFOCOMMST.2016.7905373.

96. Lebedenko T., Ievdokymenko M., Ali Salem Ali. Research of Influence Flow Characteristics to Network Routers Queues Utilization. *1st International Conference Advanced Information and Communication Technologies*. Lviv, Ukraine, 2015. P. 111–112.

97. Євдокименко М. О., Маянгані Ж. М. Інтелектуальні методи захисту інформації в телекомунікаційних мережах. «Новітні технології – для захисту повітряного простору»: матеріали 13-ої наукової конференції Харківського національного університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба (м. Харків, 2017). Харків: ХНУПС ім. І. Кожедуба, 2017. С. 25.

98. Євдокименко М. О., Єременко О. С. Аналіз легковагових криптографічних алгоритмів для безпечної передачі даних між кінцевими пристроями з обмеженими ресурсами в системі Інтернет речей. *Проблеми електромагнітної сумісності перспективних безпроводових мереж зв'язку (EMC-2019)*: Збірник наукових праць третьої міжнародної науково-технічної конференції. Харків: ХНУРЕ, 2017. С. 86–88.

99. Yevdokymenko M., Elsayed Mohamed, Paul Onwuakpa. Ethical hacking and penetration testing using raspberry PI. *Problems of Infocommunications Science and Technology (PIC S&T)*: Proceedings of the Fourth International Scientific-Practical



Conference, Kharkov, Ukraine, 10–13 October, 2017. IEEE, 2017. P. 179–181. DOI: 10.1109/INFOCOMMST.2017.8246375.

100. Yevdokymenko M., Manasse M., Zalushniy D., Sleiman B. Analysis of Methods for Assessing the Reliability and Security of Infocommunication Network. *Problems of Infocommunications Science and Technology (PIC S&T)*: Proceedings of the Fourth International Scientific-Practical Conference, Kharkov, Ukraine, 10–13 October, 2017. IEEE, 2017. P. 199–202. DOI: 10.1109/INFOCOMMST.2017.8246379.

101. Yeremenko O., Yevdokymenko M., Persikov A. Flow-aware approach of evaluating probability of compromise in combined structure network. *Advanced Information and Communication Technologies (AICT)*: Proceedings of the 2nd International Conference, Lviv, Ukraine, 4–7 July, 2017. IEEE, 2017. P. 258–261. DOI: 10.1109/AIACT.2017.8020114.

102. Lemeshko O., Yevsieieva O., Yevdokymenko M. Tensor Flow-Based Model of Quality of Experience Routing. *Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET)*: Proceedings of the 14th International Conference, Lviv-Slavske, Ukraine, 20–24 February, 2018. IEEE, 2018. P. 1005–1008. DOI: 10.1109/TCSET.2018.8336364.

103. Лемешко О.В., Євдокименко М.О. Тензорна модель забезпечення якості сприймання користувачами мультимедійного потоку. *XII Міжнародна науково-технічна конференція «Проблеми телекомунікацій» ПТ-2018*: збірник матеріалів конференції. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. С. 89–91.

104. Lemeshko O., Yeremenko O., Yevdokymenko M. Tensor Model of Fault-Tolerant QoS Routing with Support of Bandwidth and Delay Protection. *Computer Sciences and Information Technologies (CSIT)*: Proceedings of the XIIIth International Scientific and Technical Conference, Lviv, Ukraine, 5–8 Sept. 2018. IEEE, 2018. P. 135–138. DOI: 10.1109/STC-CSIT.2018.8526707.

105. Lemeshko O., Yevdokymenko M., Yeremenko O., Hailan A. Tensor QoE-based Routing Model with Evaluation of the Quality Rating. *Information and*

*Telecommunication Technologies and Radio Electronics (UkrMiCo)*: Proceedings of the International Conference, Odessa, Ukraine, 10-14 September, 2018. IEEE, 2018. P. 1–4. DOI: 10.1109/UkrMiCo43733.2018.9047545.

106. Lemeshko O., Al-Dulaimi A.M.K., Yeremenko O., Yevdokymenko M. Comparative Analysis of Solutions for Management of Time-Frequency Resource in LTE Downlink. *Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems (IDAACS)*: Proceeding of the 4th IEEE International Symposium on Wireless Systems within the International Conferences, Lviv, Ukraine, 20-21 September, 2018. IEEE, 2018. P.108–111. DOI: 10.1109/IDAACS-SWS.2018.8525626.

107. Yevdokymenko M., Sleiman B., Harkusha S., Harkusha O. Method of fault tolerance evaluation in conditions of destabilizing factors influence in infocommunication network. *Problems of Infocommunications Science and Technology (PIC S&T)*: Proceedings of the Fifth International Scientific-Practical Conference, Kharkov, Ukraine, 9-12 October 2018. IEEE, 2018. P. 571–574. DOI: 10.1109/INFOCOMMST.2018.8632077.

108. Yevdokymenko M., Shapovalova A., Voloshchuk O., Carlsson A. Proactive Approach for Security of the Infocommunication Network Based on Vulnerability Assessment. *Problems of Infocommunications Science and Technology (PIC S&T)*: Proceedings of the Fifth International Scientific-Practical Conference, Kharkov, Ukraine, 9-12 October 2018. IEEE, 2018. P. 609–612. DOI: 10.1109/INFOCOMMST.2018.8632079.

109. Лемешко О. В., Євдокименко М. О., Єременко О. С. Поточкова модель швидкої перемаршрутизації із захистом рівня обслуговування за показниками пропускної здатності та ймовірності втрат. *Фізико-технологічні проблеми передавання, оброблення та зберігання інформації в інфокомунікаційних системах*: Матеріали VII-ої міжнародної науково-практичної конференції. Чернівці: «Місто», 2018. С. 18–20.

110. Lemeshko O., Yevdokymenko M., Yeremenko O., Hailan A.M., Segeč P., Papán J. Design of the Fast ReRoute QoS Protection Scheme for Bandwidth and

Probability of Packet Loss in Software-Defined WAN. *The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronic (CADSM)*: Proceedings of the 15th International Conference, Polyana-Svalyava (Zakarpattya), Ukraine, 26 February – 2 March, 2019. P. 3/72–3/76. DOI: 10.1109/CADSM.2019.8779321.

111. Лемешко О. В., Євдокименко М. О., Єременко О. С., Мерсні А. Модель швидкої перемаршрутизації із захистом рівня QoS у телекомунікаційній мережі. *XIII Міжнародна науково-технічна конференція «Проблеми телекомунікацій» ПТ-2019*: збірник матеріалів конференції. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. С. 138–140.

112. Lemeshko O. V., Yeremenko O. S., Yevdokymenko M. O., Shapovalova A. S. Advanced solution of the Fast ReRoute based on principles of Traffic Engineering and Traffic Policing. *Science and Technology «AVIA-2019»*: Proceedings of the Fourteenth International Conference, Ukraine, 23-25 April, 2019. P. 8.21–8.23.

113. Єременко О. С., Євдокименко М. О., Шаповалова А. С. Підвищення відмовостійкості мереж засобами швидкої перемаршрутизації з балансуванням навантаження та профілюванням трафіка. *Третя міжнародна науково-технічна конференція «Комп'ютерні та інформаційні системи і технології»*: збірник наукових праць. Харків: ХНУРЕ, 2019. С. 131.

114. Євдокименко М. О., Єременко О. С., Слейман Б. Тензорна модель швидкої перемаршрутизації із захистом рівня якості обслуговування. *Третя міжнародна науково-технічна конференція «Комп'ютерні та інформаційні системи і технології»*: збірник наукових праць. Харків: ХНУРЕ, 2019. С. 132.

115. Лемешко О.В., Єременко О.С., Євдокименко М.О., Слейман Б. Модель розрахунку множини маршрутів, що не перетинаються, з максимальною пропускною здатністю в MANET. *Проблеми електромагнітної сумісності перспективних безпроводових мереж зв'язку (EMC-2019)*: Збірник наукових праць четвертої міжнародної науково-технічної конференції. Харків: ХНУРЕ, 2019. С. 75–76.

116. Lemeshko O., Yevdokymenko M., Yeremenko O., Mersni A., Segeč P., Papán J. Quality of Service Protection Scheme under Fast ReRoute and Traffic Policing Based on Tensor Model of Multiservice Network. *Information and Digital Technologies (IDT 2019)*: Proceedings of the International Conference, 25 – 27 June 2019. Zilina, Slovakia. IEEE, 2019. P. 288–295, DOI: 10.1109/DT.2019.8813675.

117. Lemeshko O., Yeremenko O., Yevdokymenko M., Shapovalova A., Ilyashenko A., Sleiman B. Traffic Engineering Fast ReRoute Model with Support of Policing. *Electrical and Computer Engineering (UKRCON)*: Proceedings of the 2nd International Conference, Lviv, Ukraine, 2 – 6 July, 2019. IEEE, 2019. P. 842–845. DOI: 10.1109/UKRCON.2019.8880006.

118. Lemeshko O., Yevdokymenko M., Yeremenko O., Nevzorova O., Snihurov A., Kovalenko T. Fast ReRoute Model with VoIP Quality of Experience Protection. *Advanced Information and Communication Technologies (AICT)*: Proceedings of the 3rd International Conference, Lviv, Ukraine, 3 – 6 July, 2019. IEEE, 2019. P. 16–21, DOI: 10.1109/AIACT.2019.8847918.

119. Lemeshko O., Yeremenko O., Yevdokymenko M., Sleiman B., Hailan A.M., Mersni A. Computation Method of Disjoint Paths under Maximum Bandwidth Criterion. *Advanced Information and Communication Technologies (AICT)*: Proceedings of the 3rd International Conference, Lviv, Ukraine, 3 – 6 July, 2019. IEEE, 2019. P. 161–164, DOI: 10.1109/AIACT.2019.8847756.

120. Lemeshko O., Yeremenko O., Yevdokymenko M., Sleiman B. Improvement of the Calculation Model the Set of Disjoint Paths with Maximum Bandwidth. *Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics (UkrMiCo)*: Proceedings of the Fourth International Conference, Odessa, Ukraine, 9 – 13 September, 2019. IEEE, 2019. P. 1–4. DOI: 10.1109/UkrMiCo47782.2019.9165311.

121. Lemeshko O., Yeremenko O., Yevdokymenko M., Shapovalova A., Hailan A. M., Mersni A. Cyber Resilience Approach Based on Traffic Engineering Fast ReRoute with Policing. *Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing*

*Systems: Technology and Applications (IDAACS)*: Proceedings of the 10th IEEE International Conference, Metz, France, 2019. IEEE, 2019. P. 117–122. DOI: 10.1109/IDAACS.2019.8924294.

122. Yevdokymenko M. Routing Tensor Model with Providing Multimedia Quality. *Problems of Infocommunications Science and Technology (PIC S&T)*: Proceedings of the Sixth International Scientific-Practical Conference, Kyiv, Ukraine, 2019. IEEE, 2019. P. 819–824. DOI: 10.1109/PICST47496.2019.9061280.

123. Lemeshko O., Yevdokymenko M., Yeremenko O. Load-Balancing Fast ReRouting Model with Providing Fair Priority-Based Traffic Policing. *Problems of Infocommunications Science and Technology (PIC S&T)*: Proceedings of the Sixth International Scientific-Practical Conference, Kyiv, Ukraine, 2019. IEEE, 2019. P. 538–542. DOI: 10.1109/PICST47496.2019.9061303.

124. Lemeshko O., Yeremenko O., Yevdokymenko M., Sleiman B. Enhanced Solution of the Disjoint Paths Set Calculation for Secure QoS Routing. *Advanced Trends in Information Theory (ATIT)*: Proceedings of the International Conference, Kyiv, Ukraine, 2019. IEEE, 2019. P. 210–213. DOI: 10.1109/ATIT49449.2019.9030520.

125. Kuzminykh I., Yevdokymenko M. Analysis of Security of Rootkit Detection Methods *Advanced Trends in Information Theory (ATIT)*: Proceedings of the International Conference, Kyiv, Ukraine, 2019. IEEE, 2019. P. 196–199. DOI: 10.1109/ATIT49449.2019.9030428.

126. Lemeshko O., Yevdokymenko M., Yeremenko O. Fast ReRoute Model with MultiMedia Quality Protection. *Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science (TCSET)*: Proceedings of the 15th International Conference, Lviv, Ukraine, 25-29 February, 2020. IEEE, 2020. P. 287–292. DOI: 10.1109/TCSET49122.2020.235441.

127. Lemeshko O., Yeremenko O., Yevdokymenko M., Hailan A.M. Tensor Based Load Balancing under Self-Similar Traffic Properties with Guaranteed QoS. *Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science*

(TCSET): Proceedings of the 15th International Conference, Lviv, Ukraine, 25-29 February, 2020. IEEE, 2020. P. 293–297, DOI: 10.1109/TCSET49122.2020.235442.

128. Lemeshko O., Yevdokymenko M., Yeremenko O. Method of Hierarchical QoS-Routing in Software-Defined Networks. *Computer and Information Systems and Technologies: Proceedings of Fourth International Scientific and Technical Conference*, Kharkiv, Ukraine. 2020. P. 81. DOI: 10.30837/IVcsitic2020201455.

129. Yeremenko O., Yevdokymenko M., Sleiman, B., Olayinka Omowumi Stephen. Fast ReRouting Flow-based Model with Implementation of Path Protection. *Computer and Information Systems and Technologies: Proceedings of the Fourth International Scientific and Technical Conference*, Kharkiv, Ukraine. 2020. P. 83. DOI: 10.30837/IVcsitic2020201458

130. Lemeshko O., Yeremenko O., Yevdokymenko M., Sleiman B., Segec P., Papan J. Advanced Performance-Based Fast Re-Routing Model with Path Protection. *Dependable Systems, Services and Technologies (DESSERT'2020): Proceedings of the 11th International Conference*. Kyiv, Ukraine, 2020. IEEE, 2020. P. 23–28. DOI: 10.1109/DESSERT50317.2020.9125034.

131. Про схвалення Концепції розвитку цифрової економіки та суспільства України на 2018–2020 роки та затвердження плану заходів щодо її реалізації: Розпорядження Кабінету Міністрів України від 17.01.2018 р. № 67-р. URL: <http://zakon3.rada.gov.ua/laws/show/67-2018-%D1%80> (дата звернення: 14.03.2018).

132. Про Рекомендації парламентських слухань на тему: «Реформи галузі інформаційно-комунікаційних технологій та розвиток інформаційного простору України»: Постанова Верховної Ради України від 31.03.2016. № 1073-VIII. *Відомості Верховної Ради* . 2016. № 17. Ст.191.

133. ITU-T Rec. Y.3001. Future Network Vision: Objectives and Design Goals. May 2011. 26 p. URL: <https://www.itu.int/rec/T-REC-Y.3001-201105-I>.

134. ITU-T Rec. Y.3011. Framework of Network Virtualization for Future Networks. January 2012. 28 p. URL:<https://www.itu.int/rec/T-REC-Y.3011-201201-I>.

135. ITU-T Rec. Y.3015. Functional architecture of network virtualization for future networks. April 2016. 30 p. URL: <https://www.itu.int/rec/T-REC-Y.3015-201604-I/en>.

136. ITU-T Rec. Y.3071. Data aware networking (information centric networking) - Requirements and capabilities. March 2017. 18 p. URL: <https://www.itu.int/rec/T-REC-Y.3071-201703-I/en>.

137. ITU-T Rec. Y.3300. Framework of software-defined networking. June 2014. 22 p. URL: <https://www.itu.int/rec/T-REC-Y.3300-201406-I/en>.

138. Wang D.W. Software Defined-WAN for the Digital Age: A Bold Transition to Next Generation Networking, CRC Press. 2018. 146 p.

139. Yang Z., Cui Y., Li B., Liu Y. and Xu Y. Software-defined wide area network (SD-WAN): Architecture, advances and opportunities. *Conference on Computer Communication and Networks (ICCCN)*: Proceedings of the 28th International Conference. 2019. P. 1–9.

140. Bannour F., Souihi S. and Mellouk A Distributed SDN control: Survey, taxonomy, and challenges. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2018. Vol. 20(1). P. 333–354.

141. Qazi Z. A., Tu C. C., Chiang L., Miao R., Sekar V. and Yu M. Simple-fying middlebox policy enforcement using SDN. *ACM SIGCOMM*: Proceedings of the 2013 International Conference, 2013. P. 27–38.

142. Gember-Jacobson A., Viswanathan R., Prakash C., Grandl R., Khalid J., Das S. and Akella A. OpenNF: Enabling innovation in network function control. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*. 2014. Vol. 44(4). P.163–174.

143. Hong C. Y., Kandula S., Mahajan R., Zhang M., Gill V., Nanduri M. and Wattenhofer R. Achieving high utilization with software-driven WAN. *ACM*

*SIGCOMM*: Proceedings of the 2013 conference on SIGCOMM, 2013, August. P. 15–26.

144. Jain S., Kumar A., Mandal S., Ong J., Poutievski L., Singh A., Venkata S., Wanderer J., Zhou J., Zhu M. and Zolla J. B4: Experience with a globally-deployed software defined WAN. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 2013. Vol. 43(4). P. 3–14.

145. Nam H., Kim K.H., Kim J.Y. and Schulzrinne H. Towards QoE-aware video streaming using SDN. *Global Communications: Proceedings of the 2014 IEEE Conference*, 2014, December. P. 1317–1322.

146. Hartert R., Vissicchio S., Schaus P., Bonaventure O., Filsfils C., Telkamp T. and Francois P. A declarative and expressive approach to control forwarding paths in carrier-grade networks. *ACM SIGCOMM computer communication review*. 2015. Vol. 45(4), P.15–28.

147. Jalaparti V., Bliznets I., Kandula S., Lucier B. and Menache I. Dynamic pricing and traffic engineering for timely inter-datacenter transfers. *ACM SIGCOMM: Proceedings of the IEEE Conference*, 2016. IEEE, 2016. P. 73–86.

148. Liu S. and Li B.. On scaling software-defined networking in wide-area networks. *Tsinghua Science and Technology*. 2015. Vol. 20(3). P. 221–232.

149. Berde P., Gerola M., Hart J., Higuchi Y., Kobayashi, M., Koide T., Lantz B., O'Connor B., Radoslavov P., Snow W. and Parulkar G. ONOS: towards an open, distributed SDN OS. *Hot topics in software defined networking: Proceedings of the third workshop*, 2014, P. 1–6.

150. Лемешко О.В., Єременко О.С., Невзорова О.С. Потоківі моделі та методи маршрутизації в інфокомунікаційних мережах: відмовостійкість, безпека, масштабованість. Харків: ХНУРЕ, 2020. 308 с.

151. Tsai P.W., Tsai C.W., Hsu C.W. and Yang C.S. Network monitoring in software-defined networking: A review. *IEEE Systems Journal*. 2018. Vol. 12(4). P. 3958–3969.



152. McKeown N., Anderson T., Balakrishnan H., Parulkar G., Peterson L., Rexford J., Shenker S. and Turner J. OpenFlow: enabling innovation in campus networks. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*. 2008. Vol. 38(2). P. 69–74.
153. Michael N. and Tang A. Halo: Hop-by-hop adaptive link-state optimal routing. *IEEE/ACM Transactions on Networking*. 2014. Vol. 23(6). P. 1862–1875.
154. Fortz B. and Thorup M. Increasing internet capacity using local search. *Computational Optimization and Applications*. 2004. Vol. 29(1), P. 13–48.
155. Bruzgiene R., Narbutaite L., Adomkus T., Pocta P., Brid P., Machaj J., Leitgeb E., Pezzeri P., Ivanov H., Kunicina N. and Zabasta A. Quality-Driven Schemes Enhancing Resilience of Wireless Networks under Weather Disruptions. *Guide to Disaster-Resilient Communication Networks*. Springer, Cham. 2020. P. 299-326.
156. ISO Central Secretary (2000) Information technology—Open Systems Interconnection—basic reference model: the basic model. Standard ISO/IEC 7498-1:1994, International Organization for Standardization, Geneva, CH. URL <https://www.iso.org/standard/20269.html>
157. Kayri M, Kayri I A proposed OSI based network troubles identification model. *International Journal of Next-Generation Networks (IJNGN)*. 2010. Vol. 2, No. 3, P. 12–18.
158. ITU-T Rec. E.800. Definition of terms related to Quality of Service. September 2008. 30 p. URL: <https://www.itu.int/rec/T-REC-E.800-200809-I>.
159. ITU-T Rec. G.1000. Communications Quality of Service: A framework and definitions. January 2001. 16 p. URL: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.1000-200111-I/en>.
160. ITU-T Rec. E.802. Framework and methodologies for the determination and application of QoS parameters. February 2007. 38 p. URL: <https://www.itu.int/rec/T-REC-E.802-200702-I>.

161. ITU-T Rec. Y.1542. Framework for achieving end-to-end IP performance objectives. June 2010. 30 p. URL: <https://www.itu.int/rec/T-REC-Y.1542-201006-I/en>.

162. ITU-T Rec. Y.1291. An architectural framework for support of Quality of Service in packet networks. May 2004. 31 p. URL: <https://www.itu.int/rec/T-REC-Y.1291-200405-I/en>.

163. ITU-T Rec. E.803. Quality of service parameters for supporting service aspects. December 2011. 52 p. URL: <https://www.itu.int/rec/T-REC-E.803-201112-I/en>.

164. ITU-T Rec. Y.1540. Internet protocol data communication service - IP packet transfer and availability performance parameters. July 2016. 57 p. URL: <https://www.itu.int/rec/T-REC-Y.1540-201607-I/en>.

165. ITU-T Rec. Y.1541. Network performance objective for IP-based services. December 2011. 66 p. URL: <https://www.itu.int/rec/T-REC-Y.1541-201112-I/en>.

166. ITU-T Rec. G.1011. Reference guide to quality of experience assessment methodologies. July 2016. 26 p. URL: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.1011-201607-I/en>.

167. ITU-T Rec. 1545.1. Framework for Monitoring the Quality of Service of Internet Protocol network services. March 2017. 24 p. URL: <https://www.itu.int/rec/T-REC-Y.1545.1-201703-I/en>.

168. ITU-T Rec. P.830. Subjective performance assessment of telephone-band and wideband digital codecs, 1996. 28 p. URL: <https://www.itu.int/rec/T-REC-P.830/en>

169. ITU-T Rec. P.863. Perceptual objective listening quality assessment, 2014. 22 p. URL: <https://www.itu.int/rec/T-REC-P.863>

170. ITU-T Rec. P.910. Subjective video quality assessment methods for multimedia application, 2008. 42 p. URL: <https://www.itu.int/rec/T-REC-P.910-200804-I/en>

171. ITU-T Rec. P.911. Subjective audiovisual quality assessment methods for multimedia applications, 1998. 27 p. URL: <https://www.itu.int/rec/T-REC-P.911-199812-I/en>

172. ITU-T Rec. P.862. Perceptual evaluation of speech quality (PESQ): An objective method for end-to-end speech quality assessment of narrow-band telephone networks and speech codecs, 2001. 34 p. URL: <https://www.itu.int/rec/T-REC-P.862>

173. ITU-T Rec. P.806. A subjective quality test methodology using multiple rating scales, 2014. 24 p. URL: <https://www.itu.int/rec/T-REC-P.806/en>

174. ITU-R Rec. BT.500. Methodology for the Subjective Assessment of the Quality of Television Pictures, 2011. 102 p. URL: <https://www.itu.int/rec/R-REC-BT.500-14-201910-I/en>

175. ITU-T Rec. G.109. Amendment 1 New Appendix I – The E-model-based quality loops for predicting speech transmission quality and user satisfaction from time-varying transmission impairments, 2007. 11 p. URL: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.109>

176. ITU-T Rec. G.107. The E-model: a computational model for use in transmission n planning, 2014. 30 p. URL: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.107-201506-I/en>

177. ITU-T Rec. G. 1070. Opinion model for video-telephony applications. June 2018. 32 p. URL: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.1070-201806-I/en>

178. ITU-T Rec. P.564. Conformance testing for voice over IP transmission quality assessment models. November 2007. 32 p. URL: <https://www.itu.int/rec/T-REC-P.564-200711-I/en>

179. ITU-T Rec. G.722.2. Digital terminal equipments – Coding of voice and audio signals. October, 2014. 32 p. URL: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.722.2-201712-I!AnnD/en>

180. ITU-T Rec. G.723.1. Dual rate speech coder for multimedia communications transmitting at 5.3 and 6.3 kbit/s. May, 2006. 64 p. URL: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.723.1-200605-I/en>

181. ITU-T Rec. G.729. Coding of speech at 8 kbit/s using conjugate-structure algebraic-code-excited linear prediction (CS-ACELP). October, 2017. 29 p. URL: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.Imp729-201710-I/en>

182. ITU-T Rec. H.222.0. Information technology – Generic coding of moving pictures and associated audio information: Systems/ August, 2018. 29 p. URL: <https://www.itu.int/rec/T-REC-H.222.0>

183. ITU-T Rec. P.10/G.100. Vocabulary for performance, quality of service and quality of experience. Recommendation P.10/G.100, International Telecommunication Union, Geneva. 42 p. URL: <https://www.itu.int/rec/T-REC-P.10-201906-I!Amd1/en>

184. Minhas T. N., Fiedler M. Quality of experience hourglass model. *Computing, Management and Telecommunications (ComManTel): Proceedings of the 2013 International Conference*, 2013. P. 87–92.

185. Yeremenko O., Lemeshko O. QoS Ensuring over Probability of Timely Delivery in Multipath Routing. *Advances in Computer Science for Engineering and Education. ICCSEEA 2018. Advances in Intelligent Systems and Computing*, Springer, Cham. 2019. Vol. 754. P. 244–254. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-319-91008-6\\_25](https://doi.org/10.1007/978-3-319-91008-6_25)

186. Sun Y. and Kumar A. June. Quality-of-protection (QoP): a quantitative methodology to grade security services. *Distributed Computing Systems Workshops: Proceedings of the 28th International Conference*, 2008. P. 394–399.

187. Yeremenko O., Lemeshko O., Persikov A. Secure Routing in Reliable Networks: Proactive and Reactive Approach. *Advances in Intelligent Systems and Computing II, CSIT 2017, Advances in Intelligent Systems and Computing*, Springer, Cham. 2018. Vol. 689. P. 631–655. DOI: 10.1007/978-3-319-70581-1\_44

188. Cholda P., Tapolcai J., Cinkler T., Wajda K., Jajszczyk A. Quality of resilience as a network reliability characterization tool. *IEEE network*. 2009. Vol. 23, No. 2. P. 11–19. DOI: 10.1109/MNET.2009.4804331.

189. Chiesa M., Kamisiński A., Rak J., Rétvári G. and Schmid S. Fast Recovery Mechanisms in the Data Plane. A Survey of Fast Recovery Mechanisms in the Data Plane. *TechRxiv. Preprint.* 2020. P. 1–47. <https://doi.org/10.36227/techrxiv.12367508.v2>

190. Bentaleb A., Begen A. C., Zimmermann R. SDNDASH: Improving QoE of HTTP Adaptive Streaming Using Software Defined Networking. *ACM on Multimedia Conference: Proceedings of the 2016 IEEE Conference*, 2016. P. 1296–1305. DOI: <https://doi.org/10.1145/2964284.2964332>

191. Calvigioni G., Aparicio-Pardo R., Sassatelli L., Leguay J., Medagliani P., Paris S. Quality of Experience-based Routing of Video Traffic for Overlay and ISP Networks. *IEEE INFOCOM: Proceedings of the IEEE Conference on Computer Communications*. 2018. P. 935–943.

192. Schatz R., Hoßfeld T., Janowski L., Egger S. From Packets to People: Quality of Experience as a New Measurement Challenge. *Lecture Notes in Computer Science*. 2013. P. 219–263. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-642-36784-7\\_10](https://doi.org/10.1007/978-3-642-36784-7_10)

193. Mellouk A., Hoceini S., Tran H. A. Quality of Experience for Multimedia: Application to Content Delivery Network Architecture. *John Wiley & Sons*, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1002/9781118649367>

194. Barakabitze A. A., Barman N., Ahmad A., Zadtootaghaj S., Sun L., Martini M.G. and Atzori L. QoE management of multimedia streaming services in future networks: a tutorial and survey. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2019. Vol. 22(1). P. 526–565.

195. Yang J., Luo J., Meng D., Hwang J.-N. QoE-Driven Resource Allocation Optimized for Delay-Sensitive VR Video Uploading over Cellular Network. *IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC): Proceedings of the IEEE Symposium*, Barcelona, Spain, 2019. P. 1–6. DOI: [10.1109/ISCC47284.2019.8969778](https://doi.org/10.1109/ISCC47284.2019.8969778).

196. Zhang Y., Zhang M., Zhang X., Han B. Multi-dimension QoE model based optimization for resource allocation in HetNets over SDN. *Communications and*

*Information Technologies (ISCIT)*: Proceedings of the 16th International Symposium, Qingdao, 2016. P. 531–536. DOI: 10.1109/ISCIT.2016.7751688.

197. Yuan D., Song M., Teng Y., Ma D., Wang X. and Lu G. QoE-oriented resource allocation for multiuser-multiservice femtocell networks. *China Communications*. 2015. Vol. 12, no. 10, P. 27–41. DOI: 10.1109/CC.2015.7315056.

198. Seyedebrahimi M. and Peng X. Optimising QoE Distribution for Video Applications through LTE-WiFi Interworking. *Next Generation Mobile Applications, Services and Technologies*: Proceedings of the 9th International Conference, Cambridge, 2015. P. 335–340. DOI: 10.1109/NGMAST.2015.70.

199. Nightingale J., Salva-Garcia P., Calero J. M. A. and Wang Q. 5G-QoE: QoE Modelling for Ultra-HD Video Streaming in 5G Networks. *IEEE Transactions on Broadcasting*. 2018. Vol. 64, no. 2, P. 621–634. DOI: 10.1109/TBC.2018.2816786.

200. Swetha S. and Raj D. Optimized video content delivery over 5G networks. *Communication and Electronics Systems (ICCES)*: Proceedings of the 2nd International Conference, Coimbatore, 2017. P. 1000–1002, DOI: 10.1109/CESYS.2017.8321232.

201. Ciambrone D., Tennina S., Boschi M., Tsoikas D. and Pomante L. Assessing QoE-driven management policies for VoIP and Video Streaming service provisioning. *Computer Aided Modeling and Design of Communication Links and Networks (CAMAD)*: Proceedings of the IEEE 23rd International Workshop, Barcelona, 2018. P. 1–6. DOI: 10.1109/CAMAD.2018.8514961.

202. Montero R., Agraz F., Pagès A. and Spadaro S. Actuation Framework for 5G-Enabled Network Slices with QoE/QoS Guarantees. *Transparent Optical Networks (ICTON)*: Proceedings of the 21st International Conference, Angers, France, 2019. P. 1–4. DOI: 10.1109/ICTON.2019.8840548.

203. Zhang H., Lu Z., Wen X. and Hu Z. QoE-Based Reduction of Handover Delay for Multimedia Application in IEEE 802.11 Networks. *IEEE Communications Letters*. 2015. Vol. 19, no. 11. P. 1873–1876. DOI: 10.1109/LCOMM.2015.2459048.

204. Xu H., Li D., Liu M., Han G., Huang W. and Xu C. QoE-Driven Intelligent Handover for User-Centric Mobile Satellite Networks. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 2020. Vol. 69, no. 9. P. 10127–10139. DOI: 10.1109/TVT.2020.3000908.

205. Ben Zineb A., Ayadi M. and Tabbane S. QoE-based vertical handover decision management for cognitive networks using ANN. *Communications and Networking (ComNet): Proceedings of the Sixth International Conference, Hammamet, 2017*. P. 1–7. DOI: 10.1109/COMNET.2017.8285600.

206. Aldhaibani O., Bouhafs F., Makay M. and Raschellá A. An SDN-Based Architecture for Smart Handover to Improve QoE in IEEE 802.11 WLANs. *Advanced Information Networking and Applications Workshops (WAINA): Proceedings of the 32nd International Conference, Krakow, 2018*. P. 287–292. DOI: 10.1109/WAINA.2018.00100.

207. Ho C., King C. and Chang Y. SCQ: Stage-Based, Context-Aware, QoE-Driven Power Optimization for Interactive Applications on Mobile Devices. *Mobile Data Management (MDM): Proceedings of the 20th IEEE International Conference, Hong Kong, 2019*. P. 343–345. DOI: 10.1109/MDM.2019.00-39.

208. Zhou L., Rodrigues J. J. P. C. and Oliveira L. M. QoE-driven power scheduling in smart grid: architecture, strategy, and methodology. *IEEE Communications Magazine*, 2012. Vol. 50, no. 5. P. 136–141. DOI: 10.1109/MCOM.2012.6194394.

209. Tang X., Huang X. and Hu F. QoE-Driven UAV-Enabled Pseudo-Analog Wireless Video Broadcast: A Joint Optimization of Power and Trajectory. *IEEE Transactions on Multimedia*, 2020. P. 1–15. DOI: 10.1109/TMM.2020.3011319.

210. He Y., Tang L., Zhou Z. and Ren Y. Long-term QoE Optimization in IoV Based on Cross-layer Resource Management. *Wireless Communications & Mobile Computing Conference (IWCMC): Proceedings of the 15th International Conference, Tangier, Morocco, 2019*. P. 465–470. DOI: 10.1109/IWCMC.2019.8766650.

211. Zhao M., Gong X., Liang J., Wang W., Que X. and Cheng S. QoE-Driven Cross-Layer Optimization for Wireless Dynamic Adaptive Streaming of Scalable Videos Over HTTP. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 2015. Vol. 25, no. 3. P. 451–465. DOI: 10.1109/TCSVT.2014.2357094.

212. Wang W. Collaborative Multimedia Source-Protocol Coordination: A Cross-Layer QoE Study in Modern Wireless Networks. *IEEE Systems Journal*, 2017. Vol. 11, no. 4. P. 2403–2409. DOI: 10.1109/JSYST.2015.2390597.

213. Chen J., Deng Y., Jia J., Dohler M. and Nallanathan A. Cross-Layer QoE Optimization for D2D Communication in CR-Enabled Heterogeneous Cellular Networks. *IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking*, 2018. Vol. 4, no. 4. P. 719–734. DOI: 10.1109/TCCN.2018.2868371.

214. Cofano G., De Cicco L., Zinner T., Nguyen-Ngoc A., Tran-Gia P. and Mascolo S. Design and experimental evaluation of network-assisted strategies for HTTP adaptive streaming. *Multimedia Systems: Proceedings of the 7th International Conference*, 2016. P. 1–12.

215. Bentaleb A., Begen A.C. and Zimmermann R. QoE-aware bandwidth broker for HTTP adaptive streaming flows in an SDN-enabled HFC network. *IEEE Transactions on Broadcasting*, 2018. Vol. 64(2). P.575–589.

216. Liotou E., Samdanis K., Pateromichelakis E., Passas N. and Merakos L. QoE-SDN APP: A rate-guided QoE-aware SDN-APP for HTTP adaptive video streaming. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2018. Vol. 36(3). P. 598–615.

217. Mansy A., Fayed M. and Ammar M. Network-layer fairness for adaptive video streams. *IFIP Networking: Proceedings of the 2015 IEEE Conference*, 2015. P. 1–9.

218. Bhat D., Rizk A., Zink M. and Steinmetz R. Network assisted content distribution for adaptive bitrate video streaming. *Multimedia Systems: Proceedings of the 8th ACM Conference*, 2017. P. 62–75.



219. Al-Issa A. E., Bentaleb A., Barakabitze A. A., Zinner T. and Ghita B. Bandwidth Prediction Schemes for Defining Bitrate Levels in SDN-enabled Adaptive Streaming. *Network and Service Management (CNSM)*: Proceedings of the 15th IEEE Conference, 2019. P. 1–7.
220. Petrangeli S., Wu T., Wauters T., Huyssegems R., Bostoën T. and De Turck F. A machine learning-based framework for preventing video freezes in HTTP adaptive streaming. *Journal of Network and Computer Applications*, 2017. Vol. 94. P.78–92.
221. Mu M., Broadbent M., Farshad A., Hart N., Hutchison D., Ni Q. and Race N. A scalable user fairness model for adaptive video streaming over SDN-assisted future networks. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2016. Vol. 34(8). P.2168–2184.
222. Chen J., Ammar M., Fayed M. and Fonseca R. Client-driven network-level QoE fairness for encrypted 'DASH-S'. *QoE-based Analysis and Management of Data Communication Networks*: Proceedings of the 2016 workshop, 2016. P. 55–60.
223. Ramakrishnan S., Zhu X., Chan F., Kambhatla K.K.R., Lu Z., Chan C. and Krishnamurthy B. Optimizing quality-of-experience for HTTP-based adaptive video streaming: An SDN-based approach. *International Journal of Multimedia Data Engineering and Management (IJMDEM)*, 2016. Vol. 7(4). P.22–44.
224. Jiang J., Hu L., Hao P., Sun R., Hu J. and Li H. Q-FDBA: improving QoE fairness for video streaming. *Multimedia Tools and Applications*, 2018. Vol. 77(9). P.10787–10806.
225. Kleinrouweler J. W., Cabrero S. and Cesar P. May. Delivering stable high-quality video: An SDN architecture with DASH assisting network elements. *Multimedia Systems*: Proceedings of the 7th International Conference, 2016. P. 1–10.
226. Dobrijevic O., Santl M. and Matijasevic M. Ant colony optimization for QoE-centric flow routing in software-defined networks. *Network and Service Management (CNSM)*: Proceedings of the 11th IEEE Conference, 2015. P. 274–278.

227. Dobrijevic O., Kassler A. J., Skorin-Kapov L. and Matijasevic M. Q-point: Qoe-driven path optimization model for multimedia services. *Wired/Wireless Internet Communications: Proceedings of the International Conference*, 2014. P. 134–147.

228. Yang J., Yang E., Ran Y. and Chen S. SDN<sup>2</sup> Cast An OpenFlow-Based, Software-Defined Scalable Multimedia Multicast Streaming Framework. *IEEE Internet Computing*, 2015. Vol. 19(4), P. 36–44.

229. Athanasopoulos D., Politis I., Lykourgiotis A., Tselios C. and Dagiuklas T. End-to-end quality aware optimization for multimedia clouds. *Telecommunications and Multimedia (TEMU): Proceedings of the International IEEE Conference*, 2016. P. 1–5.

230. Mkwawa I. H., Barakabitze A. A. and Sun L. Video quality management over the software defined networking. *International Symposium on Multimedia (ISM): Proceedings of the IEEE International Symposium*, 2016. P. 559–564.

231. Grigoriou E., Barakabitze A. A., Atzori L., Sun L. and Pilloni V. An SDN-approach for QoE management of multimedia services using resource allocation. *International Conference on Communications (ICC): Proceedings of the IEEE International Conference*, 2017. P. 1–7.

232. Hong T.P., Duc A.N., Nguyen T., Huong T.T. and Ngoc N.P. Adaptation method for streaming of CBR video over HTTP based on software defined networking. *Advanced Technologies for Communications (ATC): Proceedings of the International IEEE Conference*, 2017. P. 16–20.

233. Yang M., Li Y., Hu L., Li B., Jin D., Chen S. and YanZ. Cross-layer software-defined 5G network. *Mobile Networks and Applications*, 2015. Vol. 20(3). P.400–409.

234. Huang W., Ding L., Meng D., Hwang J.N., Xu Y. and Zhang W. QoE-based resource allocation for heterogeneous multi-radio communication in software-defined vehicle networks. *IEEE Access*, 2018. Vol. 6. P.3387–3399.

235. De Souza F. R., Miers C. C., Fiorese A. and Koslovski G. P. QoS-aware virtual infrastructures allocation on SDN-based clouds. *Cluster, Cloud and Grid*

*Computing (CCGRID)*: Proceedings of the 17th IEEE/ACM International Symposium, 2017. P. 120–129.

236. Liotou E., Tsolkas D., Passas N. and Merakos L. Quality of experience management in mobile cellular networks: key issues and design challenges. *IEEE Communications Magazine*, 2015. Vol. 53(7). P.145–153.

237. Barakabitze A. A., Mkwawa I. H., Sun L. and Ifeachor E. QualitySDN: Improving video quality using MPTCP and segment routing in SDN/NFV. *Network Softwarization and Workshops (NetSoft)*: Proceedings of the 4th IEEE Conference, 2018. P. 182–186.

238. Barakabitze A. A., Sun L., Mkwawa I. H. and Ifeachor E. A novel QoE-centric SDN-based multipath routing approach for multimedia services over 5G networks. *International Conference on Communications (ICC)*: Proceedings of the IEEE International Conference, 2018. P. 1–7.

239. Nam H., Calin D. and Schulzrinne H. Towards dynamic mptcp path control using SDN. *Network Softwarization and Workshops (NetSoft)*: Proceedings of the IEEE Conference and Workshops, 2016. P. 286–294.

240. Robinson M., Milosavljevic M., Kourtessis P., Fisher S., Stafford G. P., Treiber J., Burrell M. J. and Senior J. M. QoE based holistic traffic engineering in SDN enabled heterogeneous transport networks. *International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*: Proceedings of the 19th IEEE Conference, 2017. P. 1–4.

241. Yang S., Xu C., Zhong L., Shen J. and Muntean G. M. A QoE-Driven Multicast Strategy With Segment Routing—A Novel Multimedia Traffic Engineering Paradigm. *IEEE Transactions on Broadcasting*, 2019. Vol. 66(1). P. 34–46.

242. Wang L. and Delaney D. T. QoE Oriented Cognitive Network Based on Machine Learning and SDN. *International Conference on Communication Software and Networks (ICCSN)*: Proceedings of the 11th IEEE International Conference, 2019. P. 678–681.

243. Jahromi H. Z., Hines A. and Delanev D. T. Towards application-aware networking: ML-based end-to-end application KPI/QoE metrics characterization in SDN. *International Conference on Ubiquitous and Future Networks (ICUFN)*: Proceedings of the IEEE conference, 2018. P. 126–131.

244. Letaifa A. B., Maher G. and Mouna S. ML based QoE enhancement in SDN context: Video streaming case. *International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC)*: Proceedings of the IEEE 13th International conference, 2017. P. 103–108.

245. Pióro M., Tomaszewski A., Żukowski C., Hock D., Hartmann M., Menth M. Optimized IP-based vs. explicit paths for one-to-one backup in MPLS fast reroute. *Telecommunications Network Strategy and Planning Symposium*: Proceedings of the 14th International IEEE Symposium, 2010. P. 1–6. DOI: 10.1109/NETWKS.2010.5624923.

246. Gomes T., Tipper D., Alashaikh A. A novel approach for ensuring high end-to-end availability: The spine concept. *Design of Reliable Communication Networks (DRCN)*: Proceedings of the 10th International Conference. Ghent, Belgium, 1-3 April, 2014. IEEE, 2014. P. 1–8. – DOI: 10.1109/DRCN.2014.6816142.

247. Alashaikh A., Tipper D., Gomes T. Supporting differentiated resilience classes in multilayer networks. *Design of Reliable Communication Networks (DRCN)*: Proceedings of the 12th International Conference. Paris, France. 15-17 March, 2017. IEEE, 2016. P. 31–38. DOI: 10.1109/DRCN.2016.7470832.

248. Lemeshko A. V., Yeremenko O. S., Tariki N. Improvement of flow-oriented fast reroute model based on scalable protection solutions for telecommunication network elements. *Telecommunications and Radio Engineering*, 2017. Vol. 76, Issue 6. P. 477–490. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v76.i6.30.

249. Yeremenko O. S., Lemeshko O. V., Tariki N. Fast ReRoute Scalable Solution with Protection Schemes of Network Elements. *Electrical and Computer Engineering (UKRCON)*: Proceedings of the First Ukraine Conference, Kiev, Ukraine, 2017. IEEE, 2017. P. 783–788. DOI: 10.1109/UKRCON.2017.8100353.

250. Lemeshko O., Yeremenko O. Enhanced method of fast re-routing with load balancing in software-defined networks. *Journal of ELECTRICAL ENGINEERING*, 2017. Vol. 68, Issue 6. P. 444–454. DOI: 10.1515/jee-2017-0079.

251. Lemeshko O., Yeremenko O., Nevzorova O. Hierarchical Method of Inter-Area Fast Rerouting. *Transport and Telecommunication Journal*, 2017. Vol. 18, Issue 2. P. 155–167. DOI: 10.1515/ttj-2017-0015.

252. Lemeshko O., Yeremenko O., Tariki N. Solution for the Default Gateway Protection within Fault-Tolerant Routing in an IP Network. *International Journal of Electrical and Computer Engineering Systems*, 2017. Volume 8, Number 1. P. 19–26.

253. Rosen E., Viswanathan A. and Callon R. RFC 3031: Multiprotocol label switching architecture. 2001. 61 p. URL: <https://tools.ietf.org/html/rfc3031>.

254. Awduche D., Berger L., Gan D., Li T., Srinivasan V. and Swallow G. RFC 3209: RSVP-TE: Extensions to RSVP for LSP tunnels. 2001. 61 p. URL: <https://tools.ietf.org/html/rfc3209>.

255. Farrel A., Ayyangar A. and Vasseur J. P. RFC 5151: Inter-Domain MPLS and GMPLS Traffic Engineering-Resource Reservation Protocol-Traffic Engineering (RSVP-TE) Extensions, 2008. 25 p. URL: <https://tools.ietf.org/html/rfc5151>.

256. Pan P. RFC 4090: Fast Reroute Extensions to RSVP-TE for LSP Tunnels. 2005. 38 p. URL: <https://tools.ietf.org/html/rfc4090>.

257. Papadimitriou D. and Mannie E. RFC 4428: Analysis of generalized multi-protocol label switching (GMPLS)-based recovery mechanisms (including protection and restoration). 2006. 47 p. URL: <https://tools.ietf.org/html/rfc4428>.

258. Sprecher N. and Farrel A. RFC 6372: MPLS transport profile (MPLS-TP) survivability framework. 2011. 56 p. URL: <https://tools.ietf.org/html/rfc6372>.

259. Nadeau T., Koushik K. and Cetin R. RFC 6445: Multiprotocol label switching (mpls) traffic engineering management information base for fast reroute. 2011. 53 p. URL: <https://tools.ietf.org/html/rfc6445>.

260. Bryant S., Previdi, S. and Shand, M. RFC 6981: A framework for IP and MPLS fast reroute using not-via addresses, 2013. 34 p. URL: <https://tools.ietf.org/html/rfc6981>.

261. Taillon M., Saad T., Gandhi R., Ali Z. and Bhatia M. RFC 8271: Updates to the Resource Reservation Protocol for Fast Reroute of Traffic Engineering GMPLS Label Switched Paths (LSPs). Internet Requests for Comments, 2017. 34 p. URL: <https://tools.ietf.org/html/rfc6981>.

262. Shand M. and Bryant S. RFC 5715: A framework for loop-free convergence. 2010. 22 p. URL: <https://tools.ietf.org/html/rfc5715>

263. Teixeira R. and Rexford J. Managing routing disruptions in internet service provider networks. *IEEE Communications Magazine*, 2006. Vol. 44(3). P. 160–165.

264. Clad F., Mérindol P., Pansiot J. J., Francois P. and Bonaventure O. Graceful convergence in link-state IP networks: A lightweight algorithm ensuring minimal operational impact. *IEEE/ACM transactions on networking*, 2013. Vol. 22(1). P. 300–312.

265. Francois P., Filsfils C., Evans J. and Bonaventure O. Achieving sub-second IGP convergence in large IP networks. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 2005. Vol. 35(3). P. 35–44.

266. Shaikh A., Isett C., Greenberg A., Roughan M. and Gottlieb J. November. A case study of OSPF behavior in a large enterprise network. *Internet measurement: Proceedings of the 2nd ACM SIGCOMM Workshop*. 2002. P. 217–230.

267. J. Moy, RFC 2328: OSPF Version 2, Internet Requests for Comments, RFC Editor, 1998. 244 p. URL: <https://tools.ietf.org/html/rfc2328>

268. ISO, Intermediate System-to-Intermediate System (IS-IS) Routing Protocol, ISO/IEC 10589, 2002.

269. Chen E. and Yuan J. RFC 6286: Autonomous-system-wide unique BGP identifier for BGP-4. Internet Eng. Task Force, Fremont, CA, USA, 2011. 4 p. URL: <https://tools.ietf.org/html/rfc6286>

270. Shand M. and Bryant S. RFC 5714: IP fast reroute framework. 2010. 15 p. URL: <https://tools.ietf.org/html/rfc5714>
271. Bryant S., Filsfils C., Previdi S., Shand M., and So. N. RFC 7490: Remote Loop-Free Alternate (LFA) Fast Reroute (FRR). 2015. 29 p. URL: <https://tools.ietf.org/html/rfc7490>
272. Atlas A., Bowers C., and Enyedi G. RFC 7812: An Architecture for IP/LDP Fast Reroute Using Maximally Redundant Trees (MRT-FRR). 2016. 44 p. URL: <https://tools.ietf.org/html/rfc7812>
273. Chandrashekar J., Duan Z., Zhang Z. L. and Krasky J. Limiting path exploration in BGP. *IEEE Computer and Communications Societies: Proceedings of the IEEE 24th Annual Joint Conference, 2005*. Vol. 4. P. 2337–2348.
274. Kushman N., Kandula S., Katabi D., and Maggs B. M. R-BGP: Staying connected in a connected world. *Networked Systems Design & Implementation: Proceedings of the 4th USENIX Conference, 2007*, P. 341–354. URL: [https://www.usenix.org/legacy/events/nsdi07/tech/full\\_papers/kushman/kushman.pdf](https://www.usenix.org/legacy/events/nsdi07/tech/full_papers/kushman/kushman.pdf)
275. Gvozdiev N., Karp B. and Handley M. LOUP: The Principles and Practice of Intra-Domain Route Dissemination. *Networked Systems Design and Implementation (NSDI'13): Proceedings of the 10th USENIX Symposium, 2013*. P. 413–426.
276. Filsfils C., Mohapatra P., Bettink J., Dharwadkar P., De Vriend P., Tsier Y., Van Den Schrieck V., Bonaventure O. and Francois P. BGP Prefix Independent Convergence (PIC). Cisco, San Jose, CA, Tech. Rep. 2011. 321 p.
277. Holterbach T., Vissicchio S., Dainotti A. and Vanbever L. SWIFT: Predictive fast reroute. *ACM Special Interest Group on Data Communication: Proceedings of the ACM conference, 2017*. P. 460–473.
278. Holterbach T., Molero E. C., Apostolak M., Dainotti A., Vissicchio S. and Vanbever L. Blink: Fast connectivity recovery entirely in the data plane. *Networked Systems Design and Implementation (NSDI'19): Proceedings of the 16th USENIX Symposium, 2019*. P. 161–176.

279. Sharma S., Staessens D., Colle D., Pickavet M. and Demeester P. OpenFlow: Meeting carrier-grade recovery requirements. *Computer Communications*, 2013. Vol. 36(6). P.656–665.
280. Pfaff B., Lantz B. and Heller B. OpenFlow Switch Specification Version 1.1.0 Implemented (Wire Protocol 0x02). 2011. URL: <http://www.openflow.org/documents/openflow-spec-v1,1>.
281. Sgambelluri A., Giorgetti A., Cugini F., Paolucci F. and Castoldi P. OpenFlow-based segment protection in Ethernet networks. *Journal of Optical Communications and Networking*, 2013. Vol. 5(9). P.1066–1075.
282. Liu J., Panda A., Singla A., Godfrey B., Schapira M. and Shenker S. Ensuring connectivity via data plane mechanisms. *Networked Systems Design and Implementation (NSDI'10): Proceedings of the 10th USENIX Symposium*. 2013. P. 113–126.
283. Ramos R.M., Martinello, M. and Rothenberg, C.E. Slickflow: Resilient source routing in data center networks unlocked by openflow. *Local computer networks: Proceedings of the 38th Annual IEEE conference*. 2013. P. 606–613.
284. Stephens B., Cox A.L. and Rixner S. Plinko: Building provably resilient forwarding tables. *Hot Topics in Networks: Proceedings of the 12th ACM Workshop*. 2013. P. 1–7.
285. Bosshart P., Daly D., Gibb G., Izzard M., McKeown N., Rexford J., Schlesinger C., Talayco D., Vahdat A., Varghese G. and Walker D. P4: Programming protocol-independent packet processors. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 2014. Vol. 44(3). P.87–95.
286. Borokhovich M., Schiff L. and Schmid S. Provable data plane connectivity with local fast failover: Introducing openflow graph algorithms. *Hot topics in software defined networking: Proceedings of the third workshop*. 2014. P. 121–126.
287. Van Adrichem N.L., Van Asten B.J. and Kuipers F.A. Fast recovery in software-defined networks. *Software Defined Networks: Proceedings of the Third European Workshop*. 2014. P. 61–66.



288. Braun W. and Menth M. Loop-free alternates with loop detection for fast reroute in software-defined carrier and data center networks. *Journal of Network and Systems Management*, 2016. Vol. 24(3). P.470–490.

289. Cascone C., Pollini L., Sanvito D., Capone A. and Sanso B. SPIDER: Fault resilient SDN pipeline with recovery delay guarantees. *Network Softwarization (NetSoft): Proceedings of the 2<sup>nd</sup> IEEE Conference and Workshops*, 2016. P. 296–302.

290. Stephens B., Cox A.L. and Rixner S. Scalable multi-failure fast failover via forwarding table compression. *SDN Research: Proceedings of the Symposium*, 2016. P. 1–12.

291. McCauley J., Zhao M., Jackson E.J., Raghavan B., Ratnasamy S. and Shenker S. The deforestation of 12. *ACM SIGCOMM: Proceedings of the conference*, 2016. P. 497–510.

292. Merling D., Braun W. and Menth M. Efficient data plane protection for SDN. *Network Softwarization (NetSoft): Proceedings of the 4th IEEE Conference and Workshops*, 2018. P. 10–18.

293. Sedar R., Borokhovich M., Chiesa M., Antichi G. and Schmid S. Supporting emerging applications with low-latency failover in P4. *Networking for Emerging Applications and Technologies: Proceedings of the workshop*, 2018. P. 52–57.

294. Tanha M., Sajjadi D. and Pan J. Demystifying failure recovery for software-defined wireless mesh networks. *Network Softwarization (NetSoft): Proceedings of the 4th IEEE Conference and Workshops*, 2018. P. 488–493. DOI: 10.1109/NETSOFT.2018.8460087.

295. Braun W., Merling D. and Menth M. Destination-specific maximally redundant trees: Design, performance comparison, and applications. *Innovation in Clouds, Internet and Networks (ICIN): Proceedings of the 21st Conference*, 2018. P. 1–8. DOI: 10.1109/ICIN.2018.8401580.

296. Chan K.Y., Chen C.H., Chen Y.H., Tsai Y.J., Lee S.S. and Wu C.S. Fast Failure Recovery for In-Band Controlled Multi-Controller OpenFlow Networks.

*Information and Communication Technology Convergence (ICTC)*: Proceedings of the International conference, 2018. P. 396–401. DOI: 10.1109/ICTC.2018.8539715.

297. Thorat P., Jeon S. and Choo H. Enhanced local detouring mechanisms for rapid and lightweight failure recovery in OpenFlow networks. *Computer Communications*, 2017. Vol. 108. P. 78–93. DOI: 10.1016/j.comcom.2017.04.005.

298. Zhang X., Cheng Z., Lin R., He L., Yu S. and Luo H. Local fast reroute with flow aggregation in software defined networks. *IEEE Communications Letters*, 2017. Vol. 21, Iss. 4. P.785–788. DOI: 10.1109/LCOMM.2016.2638430.

299. Myoupo J.F., Yankam Y.F. and Tchendji V.K. A Centralized and Conflict-Free Routing Table Update Method through Triplets' Lists Vector in SDN Architectures. *SmartWorld, Ubiquitous Intelligence & Computing, Advanced & Trusted Computing, Scalable Computing & Communications, Cloud & Big Data Computing, Internet of People and Smart City Innovation (SmartWorld/SCALCOM/UIC/ATC/CBDCom/IOP/SCI)*: Proceedings of the IEEE conference, 2018. P. 1509–1515. DOI: 10.1109/SmartWorld.2018.00261.

300. Jia X., Jiang Y. and Zhu J. Link fault protection and traffic engineering in hybrid SDN networks. *Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS)*: Proceedings of the IEEE Conference, 2018. P. 853–858. DOI: 10.1109/INFCOMW.2018.8406823.

301. Hao F., Kodialam M. and Lakshman T.V. Optimizing restoration with segment routing. *Computer Communications: Proceedings of the 35th Annual IEEE International Conference*, 2016. P. 1–9. DOI: 10.1109/INFOCOM.2016.7524551.

302. Alhaqbani M. and H. LIU. Conceptual Mechanism Software Defined Network Topology in Multiprotocol Label Switching Network Domain. *Computational Science and Computational Intelligence (CSCI)*: Proceedings of the International Conference, 2017. P. 680–684. DOI: 10.1109/CSCI.2017.117.

303. Lemeshko O., Arous K. and Tariki N. Effective solution for scalability and productivity improvement in fault-tolerant routing. *Problems of Infocommunications Science and Technology (PIC S&T)*: Proceedings of the Second International

Scientific-Practical Conference, 2015. P. 76–78. DOI: 10.1109/INFOCOMMST.2015.7357274.

304. Lemeshko O. and Yeremenko O. Linear optimization model of MPLS Traffic Engineering Fast ReRoute for link, node, and bandwidth protection. *Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET): Proceedings of the 14th International Conference*, 2018. P. 1009–1013. DOI: 10.1109/TCSET.2018.8336365.

305. Cruz P., Gomes T. and Medhi D. A Heuristic for Widest Edge-disjoint Path Pair Lexicographic Optimization. *Reliable Networks Design and Modeling (RNDM): Proceedings of the 6th International Workshop*, 2014. P. 9–15. DOI: 10.1109/RNDM.2014.7014925.

306. Евсеева О. Ю. Диакоптическая тензорная модель ТКС в базисе путей и внутренних разрезов. *Проблемы телекоммуникаций*. 2010. № 1(1). С. 6–22. URL: [http://pt.nure.ua/wp-content/uploads/2020/01/101\\_yevseyeva\\_diakoptics.pdf](http://pt.nure.ua/wp-content/uploads/2020/01/101_yevseyeva_diakoptics.pdf).

307. Lemeshko O. V., Yeremenko O. S. Dynamics Analysis of Multipath QoS-Routing Tensor Model with Support of Different Flows Classes. *Smart Systems and Technologies (SST): Proceedings of the International Conference*, Osijek, Croatia, 12–14 Oct. 2016. IEEE, 2016. P. 225–230. DOI: 10.1109/SST.2016.7765664.

308. Lemeshko O., Yeremenko O. Routing Tensor Model Presented in the Basis of Interpolar Paths and Internal Node Pairs. *Problems of Infocommunications Science and Technology (PIC S&T): Proceedings of the Third International Scientific-Practical Conference*, Kharkiv, Ukraine, 4–6 Oct. 2016. IEEE, 2016. P. 201–204. DOI: 10.1109/INFOCOMMST.2016.7905381.

309. Strelkovskaya I.V. Tensor decomposition in the structure optimization tasks of LTE/MVNO networks. *Communications and Networking (IEEE BlackSeaCom 2014): Proceedings of the Second International Black Sea Conference*, 2014. P. 126.

310. Strelkovskaya I.V. and Solovskaya I.N. Tensor model of multiservice network with different classes of traffic service. *Radioelectronics and Communications Systems*. 2013. Vol. 56(6). P.296–303.

311. Lemeshko O. V., Yeremenko O. S., Hailan A. M. Investigation of Multipath QoS-Routing Dynamic Tensor Model. *Electronics and Information Technology (EIT): Proceedings of the International Conference, Odessa, Ukraine, 23-27 May, 2016*. IEEE, 2016. P. 59–62. DOI: 10.1109/ICEAIT.2016.7500992.

312. Lemeshko O. and Yeremenko O. Dynamic presentation of tensor model for multipath QoS-routing. *Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science (TCSET): Proceedings of the 13th International Conference, 2016*. P. 601–604. IEEE.

313. Крылов В.В., Самохвалова С.С. Теория телетрафика и ее приложения СПб.: БХВ-Петербург, 2005. 288 с.

314. Лемешко А. В., Еременко А. С. Динамическое представление тензорной модели многопутевой QoS-маршрутизации в нестационарном режиме работы сетевых интерфейсов. *Проблеми телекомунікацій*. 2016. № 1 (18). С. 3–21. URL: [http://pt.nure.ua/wp-content/uploads/2020/01/161\\_lemeshko\\_dynamic.pdf](http://pt.nure.ua/wp-content/uploads/2020/01/161_lemeshko_dynamic.pdf).

315. Yeremenko O. Development of the dynamic tensor model for traffic management in a telecommunication network with the support of different classes of service. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2016. Vol. 6, Issue 9 (84). P. 12–19. DOI: 10.15587/1729-4061.2016.85602

316. Лемешко О. В., Єременко О. С. Особливості використання тензорного підходу для опису динаміки зміни стану мережі при забезпеченні якості обслуговування. *X Міжнародна науково-технічна конференція «Проблеми телекомунікацій» ПТ-2016: збірник матеріалів конференції (м. Київ, 19-22 квітня 2016 р.)*. Київ: НТУУ «КПІ», 2016. С. 34–36.

317. Лемешко О. В., Єременко О. С. Тензорна модель відмовостійкої QoS маршрутизації в інфокомунікаційній мережі. *XII Міжнародна науково-технічна конференція «Проблеми телекомунікацій» ПТ-2018: Збірник матеріалів конференції (м. Київ, 16–20 квітня 2018 р.)*. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. С. 110–112.

318. Лемешко А. В., Евсева О. Ю. Тензорная геометризация структурно-функционального представления телекоммуникационной системы в базисе межполюсных путей и внутренних разрезов. *Наукові записки УНДІЗ*. 2010. Вип. 1, № 13. С. 14–26.

319. Phan A. H., Cichocki A., Uschmajew A., Tichavský P., Luta G. and Mandic D. P. Tensor Networks for Latent Variable Analysis: Novel Algorithms for Tensor Train Approximation. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*. 2020. Vol. 31, no. 11. P. 4622–4636. DOI: 10.1109/TNNLS.2019.2956926.

320. Cichocki A., Lee N., Oseledets I., Phan A.-H., Zhao Q. and Mandic D.P. Tensor Networks for Dimensionality Reduction and Large-scale Optimization: Part 1 Low-Rank Tensor Decompositions. *Foundations and Trends in Machine Learning*. 2016. Vol. 9: No. 4-5. P 249–429.

321. Cichocki A. et al. Tensor Networks for Dimensionality Reduction and Large-scale Optimization: Part 2 Applications and Future Perspectives. *Foundations and Trends® in Machine Learning*. 2017. Vol. 9(6). P. 249–429. DOI: 10.1561/22000000067.

322. Dou Z., Li C., Li C., Gao X. and Qi L. Tensor Communication Waveform Design With Semi-Blind Receiver in the MIMO System. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 2020. Vol. 69, no. 2. P. 1727–1740. DOI: 10.1109/TVT.2019.2958402.

323. Стрелковская И. В., Соловская И. Н. Тензорная модель мультисервисной сети с различными классами обслуживания трафика. *Радиоэлектроника: Изв. высш. учеб. заведений*. 2013. Т. 56, № 6. С. 40-47. URL: <http://radio.kpi.ua/article/view/S0021347013060058>.

324. Strelkovskaya I. V., Solovskaya I. N. Tensor model of multiservice network with different classes of traffic service. *The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics (CADSM'2013)*: Proceedings of the XII International Conference, 2013. P. 355–358.

325. Литвинов А. Л. Теорія систем масового обслуговування : навч. посібник. Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2018. 141 с.
326. Клейнрок Л. Вычислительные системы с очередями. М.: Мир, 1979. 600 с.
327. Саати Т. Л. Элементы теории массового обслуживания и ее приложения М.: Советское радио, 1965. 520 с.
328. Moore H. MATLAB for Engineers. 5th Edition. Pearson, 2017. 688 p.
329. Lockhart S., Tilleson E. An Engineer's Introduction to Programming with MATLAB. SDC Publications Mission. KS, United States, 2019. 256 p.
330. Bentaleb A. Begen A. C., Zimmermann R. SDNDASH: Improving QoE of HTTP Adaptive Streaming Using Software Defined Networking. *Multimedia: Proceeding of the ACM conference*, 2016. P. 1296–1305.
331. Calvigioni G. Aparicio-Pardo R., Sassatelli L., Leguay J., Medagliani P., and Paris S. Quality of experience-based routing of video traffic for overlay and isp networks. *Computer Communications (INFOCOM): Proceeding of the IEEE International conference*, 2018. P.207–219.
332. Лемешко А. В., Арус К. М., Еременко А. С. Обеспечение отказоустойчивости решений по многоадресной маршрутизации в телекоммуникационной сети в условиях передачи мультимедийного трафика. *IX Міжнародна науково-технічна конференція «Проблеми телекомунікацій» ПТ-2015: збірник матеріалів конференції (м. Київ, 21-24 квіт. 2015 р.)*. Київ: НТУУ «КПІ», 2015. С. 146–148.
333. Lemeshko O. V., Yeremenko O. S., Tariki N., Hailan A. M. Fault-Tolerance Improvement for Core and Edge of IP Network. *Computer Sciences and Information Technologies (CSIT): Proceedings of the XIth International Scientific and Technical Conference, Lviv, Ukraine, 6-10 Sept. 2016*. IEEE, 2016. P. 161–164. DOI: 10.1109/STC-CSIT.2016.7589895
334. Месарович М., Мако Д., Такахара И. Теория иерархических многоуровневых систем. Москва: Мир, 1973. 344 с.

335. Сингх М., Титли А. Системы: декомпозиция, оптимизация и управление. Москва: Машиностроение, 1986. 494 с.

336. Поповский В. В. Основы теории телекоммуникационных систем. LAPLAMBERTAcademicalPublishing, 2018. 565 с.

337. Поповский В. В., Лемешко А. В., Евсева О. Ю. Динамическое управление ресурсами ТКС: математические модели в пространстве состояний. *Наукові записки УНДІЗ*. 2009. №1(9). С. 3-26.

338. Евсева О. Ю., Гаркуша С. В. Обзор технологических и теоретических решений в области маршрутизации на основе качества обслуживания. *Проблеми телекомунікацій*. 2012. № 3(8). С. 24–46. URL: [http://pt.journal.kh.ua/2012/3/1/123\\_evseeva\\_review.pdf](http://pt.journal.kh.ua/2012/3/1/123_evseeva_review.pdf).

339. Yeremenko O., Nevzorova O., Ali S. A. Two-level method of fault-tolerant inter-area routing. *The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronic (CADSM)*: Proceedings of the 14th International Conference, Lviv, Ukraine, 21–25 February, 2017. IEEE, 2017. P. 105–108. DOI: 10.1109/CADSM.2017.7916096.

340. Лемешко О. В., Єременко О. С. Ієрархічна QoS-маршрутизація в телекомунікаційній мережі на основі резервування ресурсів. *Проблеми електромагнітної сумісності перспективних безпроводних мереж зв'язу (ЭМС-2017)*: Сборник научных трудов третьей международной научно-технической конференции (г. Харьков, 23–24 мая 2017 г.). Харьков: ХНУРЭ, 2017. С. 84–86.

341. Lemeshko O., Yeremenko O., Nevzorova O., Vavenko T. Three-level Method of Hierarchical Coordination Routing in Multi-Area Network. *Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics (UkrMiCo)*: Proceedings of the International Conference, Odessa, Ukraine, 11-15 September, 2017. IEEE, 2017. P. 1–5. DOI: 10.1109/UkrMiCo.2017.8095410.

342. Lemeshko O., Yeremenko O., Hailan A. M. Two-level Method of Fast ReRouting in Software-Defined Networks. *Problems of Infocommunications Science and Technology (PIC S&T)*: Proceedings of the Fourth International Scientific-

Practical Conference, Kharkov, Ukraine, 10–13 October, 2017. IEEE, 2017 P. 376–379. DOI: 10.1109/INFOCOMMST.2017.8246420.

343. Wehrle K., Günes M., Gross J. Modeling and Tools for Network Simulation. Springer-Verlag. Berlin Heidelberg. 2010. 545 p. DOI: 10.1007/978-3-642-12331-3

344. Khan S., Aziz B., Najeeb S., Ahmed A., Usman M., Ullah S. Reliability of network simulators and simulation based research. *Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC)*: Proceedings of the IEEE 24th Annual International Symposium, London, 2013. P. 180–185. DOI: 10.1109/PIMRC.2013.6666127.

345. Riley G.F., Henderson T.R. The NS-3 Network Simulator. Modeling and Tools for Network Simulation. Springer. 2010. P 15–34. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-642-12331-3\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-642-12331-3_2)

346. Burbank J. L. An Introduction to Network Simulator 3. Wiley, 2018. 400 p.

347. Altman E., Jiménez T. NS Simulator for Beginners. Morgan & Claypool. 2012. 184 p. DOI: 10.2200/S00397ED1V01Y201112CNT010.

348. NS3. URL: <http://www.nsnam.org>, Accessed on 10-08-2012.

349. Kwame N. W., Freeman E. and Asante M. An Innovative Technique for Analyzing Network Performance and Congestion in a Hybrid Network Topology. *Computing, Computational Modelling and Applications (ICCMA)*: Proceedings of the International Conference, Cape Coast, Ghana, 2019. P. 60–65. DOI: 10.1109/ICCMA.2019.00017.

350. RFC 3393. IP Packet Delay Variation Metric for IP Performance Metrics (IPPM). 2002. 20 p. URL: <https://tools.ietf.org/html/rfc3393>.

351. Бройдо В.Л. Вычислительные системы, сети и телекоммуникации: учебное пособие. СПб.: Питер, 2004. 703 с.

352. RFC 4105. Requirements for Inter-Area MPLS Traffic Engineering. June 2005. 22 p. URL: <https://tools.ietf.org/pdf/rfc4105.pdf>.

353. Mustapha O. Z., Hu Y. F., Abd-Alhameed R. A., Abdullahi H. S. Approach to Label Distribution Protocol Signaling Using Multimedia Services for Bandwidth Allocation. *Computer Modelling and Simulation (UKSim)*: Proceedings of the 20th



International Conference, Cambridge, 2018. P. 157–162. DOI: 10.1109/UKSim.2018.00039.

354. Soewito B., Gunawan F. E., Afdhal S., Antonyova A. Analysis of quality network using MPLS and non MPLS. *Intelligent Technology and Its Applications (ISITIA)*: Proceedings of the International Seminar, Surabaya, 2017. P. 1–4. DOI: 10.1109/ISITIA.2017.8124044.

355. Tahir J., Siddiqi M. Z., Arif S. Performance analysis of MPLS based networks with conventional networks. *Recent Trends in Telecommunications Research (RTTR)*: Proceedings of the 2nd Workshop, Palmerston North, 2017. P. 1–4. DOI: 10.1109/RTTR.2017.7887873.

356. Imran M., Khan M. A., Abdul Qadeer M. Design and Simulation of Traffic Engineering using MPLS in GNS3 Environment. *Computing Methodologies and Communication (ICCMC)*: Proceedings of the Second International Conference, Erode, 2018. P. 1026–1030. DOI: 10.1109/ICCMC.2018.8487981.

357. Yadav S., Jeyakumar A. Design of traffic engineered MPLS VPN for protected traffic using GNS simulator. *Wireless Communications, Signal Processing and Networking (WiSPNET)*: Proceedings of the International Conference, Chennai, 2016. P. 405–409. DOI: 10.1109/WiSPNET.2016.7566165.

358. Mehraban S., Vora K. B., Upadhyay D. Deploy Multi Protocol Label Switching (MPLS) Using Virtual Routing and Forwarding (VRF). *Trends in Electronics and Informatics (ICOEI)*: Proceedings of the 2nd International Conference, Tirunelveli, 2018. P. 543–548. DOI: 10.1109/ICOEI.2018.8553949.

359. Fathima K. M. M. A Survey on Multiprotocol Label Switching in Virtual Private Networks. *I-SMAC (IoT in Social, Mobile, Analytics and Cloud) (I-SMAC)I-SMAC (IoT in Social, Mobile, Analytics and Cloud) (I-SMAC)*: Proceedings of the 2nd International Conference, Palladam, India, 2018. P. 737–740. DOI: 10.1109/I-SMAC.2018.8653745.

360. Ali E. K., Manel M., Habib Y. An Efficient MPLS-Based Source Routing Scheme in Software-Defined Wide Area Networks (SD-WAN). *Computer Systems*

*and Applications (AICCSA)*: Proceedings of the IEEE/ACS 14th International Conference, Hammamet, 2017. P. 1205–1211. DOI: 10.1109/AICCSA.2017.165.

361. Lemeshko O., Romanyuk A., Kozlova H. Design schemes for MPLS Fast ReRoute. *Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics (CADSM) 2013*: Proceedings of the 12th International Conference. Polyana Svalyava, Ukraine, 19-23 February, 2013. IEEE, 2013. P. 202–203.

362. Kouicem D. E., Fajjari I., Aitsaadi N. An enhanced Path Computation for Wide Area Networks based on Software Defined Networking. *Integrated Network and Service Management (IM)*: Proceedings of the IFIP/IEEE Symposium, Lisbon, 2017. P. 664–667. DOI: 10.23919/INM.2017.7987355.

363. Shози T., Dlamini S., Mudali P., Kobo H. SDN-enabled Switch Placement in Multi-Domain Hybrid SD-WAN. *AFRICON*: Proceedings of the International Conference. Accra, Ghana, 2019. P. 1–7, DOI: 10.1109/AFRICON46755.2019.9133813.

364. Halder R., Mundra S., Dey U., Ghosh S., Karmakar S., Karmakar R. NS3TCG: NS3 Topology and Code Generator. *Recent Innovations in Electrical, Electronics & Communication Engineering (ICRIEECE)*: Proceedings of the International Conference. Bhubaneswar, India, 2018. P. 865–870. DOI: 10.1109/ICRIEECE44171.2018.9008653.

365. Prajapati A., Sakadasariya A., Patel J. Software defined network: Future of networking. *Inventive Systems and Control (ICISC)*: Proceedings of the 2nd International Conference. Coimbatore, 2018. P. 1351–1354. DOI: 10.1109/ICISC.2018.8399028.

**ДОДАТОК А****АКТИ ВПРОВАДЖЕННЯ**

ЗАТВЕРЖУЮ

Перший проректор  
Харківського національного  
університету радіоелектроніки

д.т.н., професор  І.В. Рубан  
« 18 » \_\_\_\_\_ 2020 р.



## АКТ

про впровадження результатів дисертаційної роботи Євдокименко Марини Олександрівни, яка представляється на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.12.02 – телекомунікаційні системи та мережі

Комісія у складі:

**голови** – д.т.н., проф., проф. каф. ІКІ ім. В.В. Поповського Лемешка О.В.,  
відповідального виконавця НДР №261-1;

**членів** – д.т.н., проф., проф. каф. ІКІ ім. В.В. Поповського Агеєва Д.В.,  
виконавця НДР № 261-1;

– д.т.н., доц., проф. кафедри ІКІ ім. В.В. Поповського,  
Москальца М.В., виконавця НДР №261-1;

склала наступний акт про те, що результати дисертаційної роботи Євдокименко М.О., а саме:

- тензорні моделі маршрутизації із вдосконаленням умов забезпечення якості обслуговування за множиною показників мережної продуктивності та показників, що сприймаються на рівні користувачів;
  - рекомендації щодо підвищення продуктивності телекомунікаційних мереж за рахунок використання отриманих рішень QoS-маршрутизації;
- впроваджено у НДР №261-1 (ДР №01111U002627) «Методи підвищення продуктивності безпроводових мереж наступного покоління», що виконана за держзамовленням.

Голова комісії

Члени комісії

О.В. Лемешко

Д.В. Агеєв

Н.В. Москалець



ЗАТВЕРЖУЮ

Перший проректор  
Харківського національного  
університету радіоелектронікид.т.н., професор  І.В. Рубан  
«27» \_\_\_\_\_ 2020 р.

АКТ

про виконання у навчальному процесі результатів дисертаційної роботи Євдокименко Марини Олександрівни, представлену на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.12.02 – телекомунікаційні системи та мережі

Комісія у складі:

*голови* – к.т.н., доц. каф. ІКІ ім. В.В. Поповського, Снігурова А.В.;*членів* – к.т.н., доц. проф. каф. ІКІ ім. В.В. Поповського Радівілової Т.А.;  
– доц. каф. ІКІ ім. В.В. Поповського Сабурової С.О.;

розглянула дисертаційну роботу Євдокименко М.О. та дійшла наступному висновку:

матеріали дисертації використовуються в навчальному процесі Харківського національного університету радіоелектроніки, а саме

- тензорні моделі маршрутизації та швидкої перемаршрутизації мультимедійного трафіка із забезпеченням якості сприйняття послуг, що надаються кінцевим користувачам у телекомунікаційній мережі за показником мультимедійної якості;
- тензорні моделі маршрутизації та швидкої перемаршрутизації голосового трафіка із забезпеченням якості сприйняття послуг, що надаються кінцевим користувачам у телекомунікаційній мережі за R-фактором;

що є частиною лекційного курсу та курсу практичних занять з дисциплін «Маршрутизація в ТКС», «Алгоритми управління та адаптації в ТКС» і «Telecommunication transmission systems» для студентів першого (бакалаврського) рівня спеціальності 172 – Телекомунікації та радіотехніка.

Голова комісії

Члени комісії

А.В. СнігуровТ.А. РадівіловаС.О. Сабурова

## ЗАТВЕРДЖУЮ

Харківський державний  
регіональний науково-технічний центр  
з питань технічного захисту інформації  
Пономарьова Г.М.



« 4 » \_\_\_\_\_ 2020 р.

## АКТ

про використання результатів дисертаційної роботи Євдокименко Марини  
Олександрівни, представлену на здобуття наукового ступеня доктора  
технічних наук за спеціальністю 05.12.02 – телекомунікаційні системи та  
мережі

Комісія у складі:

голови: Г.М.Пономарьова, Директор «ХДРНТЦ ТЗІ»;

членів: Сацюк В.В., «ХДРНТЦ ТЗІ»;

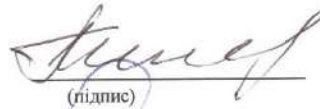
Тимашек Н.В., «ХДРНТЦ ТЗІ»;

склала даний акт у тому, що результати дисертаційної роботи Євдокименко  
М.О., а саме:

- метод ієрархічно-координаційної відмовостійкої маршрутизації із забезпеченням захисту рівня якості обслуговування в мультидомених телекомунікаційних мережах за показниками пропускну здатності та середньої міжкінцевої затримки пакетів;
- модель міждоменної маршрутизації із забезпеченням міжкінцевої якості обслуговування в мультидомених телекомунікаційних мережах за показниками пропускну здатності та середньої міжкінцевої затримки пакетів,

впроваджено в діяльність підприємства «ХДРНТЦ ТЗІ» для моніторингу параметрів якості послуг, що надаються операторами та провайдерами мобільних і фіксованих інфокомунікаційних мереж України.

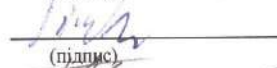
Голова комісії

  
(підпис)

Г.М.Пономарьова

(ініціали та прізвище)

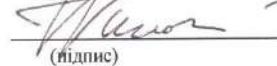
Член комісії

  
(підпис)

В.В.Сацюк

(ініціали та прізвище)

Член комісії

  
(підпис)

Н.В.Тимашек

(ініціали та прізвище)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор ТОВ «ВОРКНЕСТ»

Колесніков О.К.

«05» вересня 2020 р.

### АКТ

про використання результатів дисертаційної роботи Євдокименко Марини Олександрівни за темою «Теоретичні основи відмовостійкої маршрутизації чутливого до затримок та втрат трафіка в телекомунікаційних мережах з використанням тензорних моделей і методів», представлену на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.12.02 – телекомунікаційні системи та мережі

Комісія у складі:

**голови:** - начальника відділу R&D Колесніков О.К.;

**членів:** - начальника відділу QA Чубатенко О.К.;

- провідного спеціаліста Вергеліс А.В.;

склала даний акт у тому, що результати дисертаційної роботи Євдокименко М.О., а саме:

- тензорні моделі маршрутизації та швидкої перемаршрутизації мультимедійного трафіка із забезпеченням якості сприйняття мультимедійних послуг, що надаються кінцевим користувачам у телекомунікаційній мережі;
- тензорні моделі маршрутизації та швидкої перемаршрутизації голосового трафіка із забезпеченням якості сприйняття послуг, що надаються кінцевим користувачам у телекомунікаційній мережі за R-фактором;

були використані про розробці та модернізації програмного забезпечення для мережного обладнання сучасних телекомунікаційних мереж з метою підвищення продуктивності мережі та якості надання телекомунікаційних послуг.

Голова комісії

Член комісії

Член комісії



Колесніков О.К.  
(ініціали та прізвище)

Вергеліс А.В.  
(ініціали та прізвище)

Чубатенко О.К.  
(ініціали та прізвище)



ЗАТВЕРДЖУЮ

ПрАТ «Фарлеп-Інвест»

« 08 » 08 2020 р.

## АКТ

про використання результатів дисертаційної роботи Євдокименко Марини Олександрівни за темою «Теоретичні основи відмовостійкої маршрутизації чутливого до затримок та втрат трафіка в телекомунікаційних мережах з використанням тензорних моделей і методів», представлену на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.12.02 – телекомунікаційні системи та мережі

Комісія у складі:

голови: Гришич Андрій Васильович, Коммерційний керівник  
 членів: Муцаєв А.П. Технічний керівник;  
Розум Є.А. Інженер

склала даний акт у тому, що результати дисертаційної роботи Євдокименко М.О., а саме:

- модель швидкої перемаршрутизації трафіка даних із захистом рівня якості обслуговування за показниками пропускної здатності та ймовірності втрат пакетів у телекомунікаційній мережі;
- тензорні моделі маршрутизації та швидкої перемаршрутизації голосового трафіка із забезпеченням якості сприйняття послуг, що надаються кінцевим користувачам у телекомунікаційній мережі за R-фактором, при реалізації схем захисту каналів, вузлів та маршруту (маршрутів),

впроваджено в діяльність підприємства ПрАТ «Фарлеп-Інвест» при розробці практичних рекомендації щодо підвищення рівня якості обслуговування сприйняття послуг, що надаються кінцевим користувачам та рівня якості обслуговування в телекомунікаційних мережах в цілому.

Голова комісії

(підпис)

Гришич А.П.  
(ініціали та прізвище)

Член комісії

(підпис)

Муцаєв А.П.  
(ініціали та прізвище)

Член комісії

(підпис)

Розум Є.А.  
(ініціали та прізвище)

## ДОДАТОК Б

### ПРОМІЖНІ РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАПРОПОНОВАНИХ МОДЕЛЕЙ ТА МЕТОДІВ МАРШРУТИЗАЦІЇ

#### Б.1. Проміжні результати дослідження процесів маршрутизації за допомогою запропонованої в другому розділі тензорної моделі телекомунікаційної мережі

З метою оцінки переваг від використання тензорної моделі при розв'язанні задач маршрутизації чутливого до затримок трафіка було проведено дослідження отриманого рішення та його порівняльний аналіз з відомими маршрутними рішеннями. Розглядався варіант без врахування втрат пакетів, коли робота інтерфейсів маршрутизаторів моделювалась СМО М/М/1, тобто буфер черг мав необмежену ємність. Запропоноване рішення задачі QoS-маршрутизації (model 1) базувалось на результатах розв'язання оптимізаційної задачі з критерієм оптимальності, який пов'язаний з мінімізацією виразу (2.58) як окремого випадку критерію (2.78). Друга модель маршрутизації (model 2), яка використовувалась у процесі порівняльного аналізу, базувалась на застосуванні маршрутних метрик у квадратичній цільовій функції, яка підлягала мінімізації,

$$J = \sum_{k \in K} \sum_{w_{i,j} \in W} h_{i,j}^x \left( \lambda_k^{\langle \text{вум} \rangle} x_{i,j}^k \right)^2, \quad (\text{Б.1})$$

де  $h_{i,j}^x = 10^7 / \varphi_{i,j}$  – маршрутна метрика каналу зв'язку  $w_{i,j}$ , аналогічна до метрик протоколів EIGRP та OSPF.

Третє рішення (model 3) представлено моделлю маршрутизації потоків пакетів відповідно до вимог концепції Traffic Engineering. В межах цієї моделі використовувався критерій оптимальності (2.76).

Вихідними даними для дослідження виступала структура ТКМ, яка представлена на рис. Б.1. На цьому рисунку у розривах каналів зв'язку вказані їхні пропускні здатності (1/с). Джерелом пакетів виступав перший маршрутизатор, а отримувачем – дев'ятий маршрутизатор. З точки зору описаної в п. 2.1.2 тензорної моделі структура ТКМ (рис. Б.1) визначає 9-ти вимірний геометричний простір, а основні структурні характеристики приймали такі значення:  $n = 12$ ,  $\kappa(S) = 5$ ,  $\vartheta(S) = 7$ . На рис. Б.2 показано приклад введення на структурі ТКМ базису міжполюсних шляхів і внутрішніх вузлових пар.

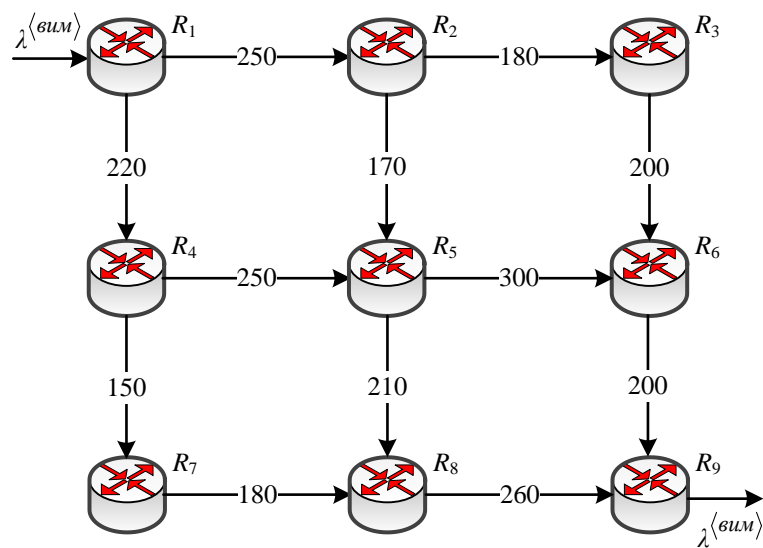


Рис. Б.1. Приклад структури ТКМ, яка підлягала дослідженню

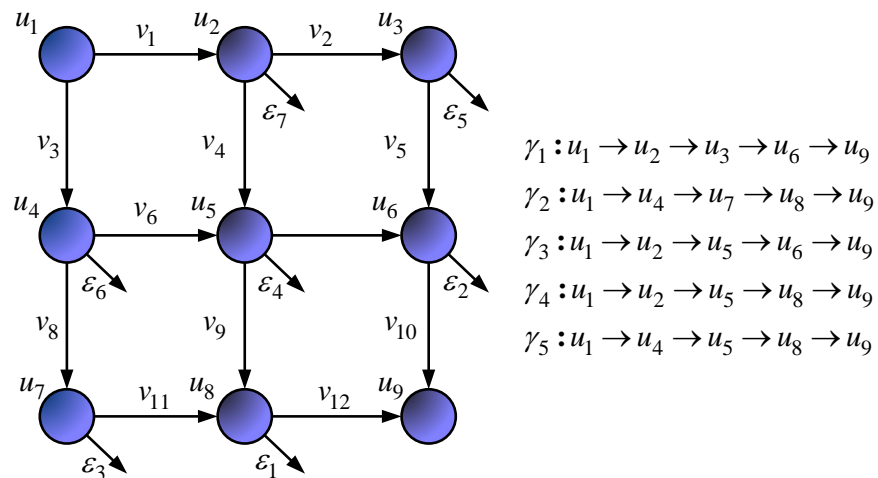


Рис. Б.2. Приклад опису ТКМ одновимірною мережею з визначенням базисних міжполюсних шляхів і внутрішніх вузлових пар

Для введених на рис. Б.2 систем координат матриця коваріантного координатного перетворення приймала такий вигляд

$$A_{\gamma\varepsilon}^v = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

У процесі дослідження інтенсивність вхідного потоку змінювалась у діапазоні  $\lambda^{\langle \text{вим} \rangle} = 10 \div 430$  1/с з тією метою, щоб  $\tau_{MP} \leq 150$  мс. Ефективність порівнюваних маршрутних рішень (model 1 ÷ model 3) оцінювалась за показником середньої міжкінцевої затримки пакетів (СМЗП) (2.58).

На рис. Б.3 показано динаміку зміни СМЗП у залежності від навантаження на мережу ( $\lambda^{\langle \text{вим} \rangle}$ ). При невисокому навантаженні, коли  $\lambda^{\langle \text{вим} \rangle} \leq 300$  1/с, всі три моделі забезпечували значення  $\tau_{MP}$ , яке не перевищувало 50 мс.

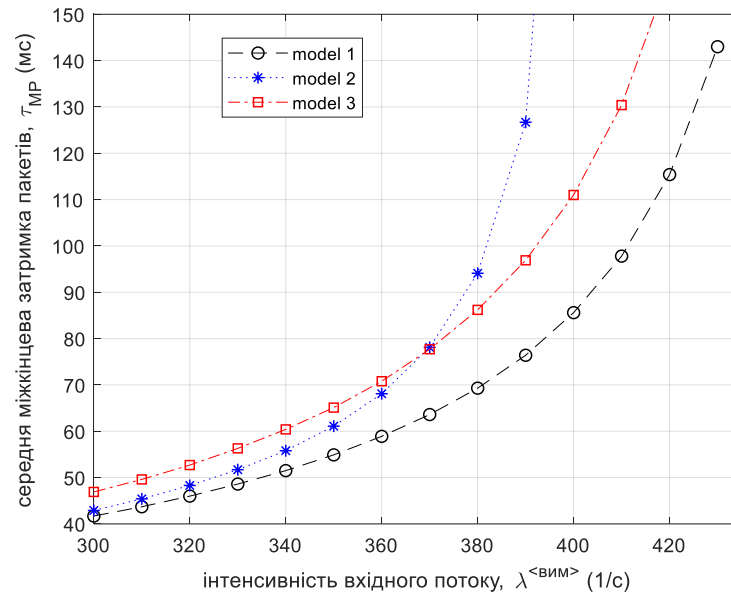


Рис. Б.3. Динаміка зміни СМЗП у залежності від навантаження на ТКМ

Із подальшим зростанням навантаження кращу ефективність постійно забезпечувала запропонована у роботі модель (model 1). Як показано на рис. Б.4, вигреш за СМЗП у порівнянні з моделлю на основі маршрутних метрик (model 2) складав від 3 до 50%, а при критичному навантаженні ( $\lambda^{<vum>} \geq 410$  1/с) – до 100% (крива «вигреш 1-2»).

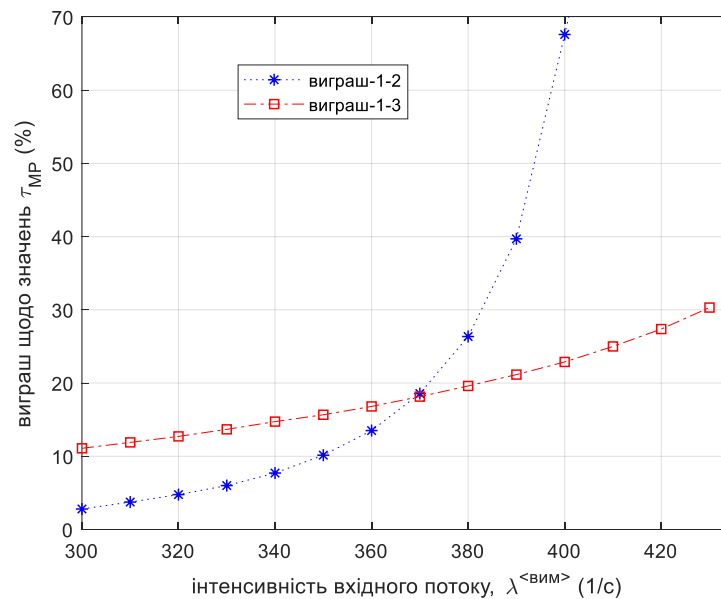


Рис. Б.4. Вигреш за СМЗП від застосування запропонованої моделі маршрутизації в залежності від навантаження на мережу

У порівнянні с моделлю маршрутизації на принципах TE (model 3) виграш за СМЗП складав від 11 до 30% (крива «виграш 1-3» на рис. Б.4). Подібний виграш запропонована модель маршрутизації змогла забезпечити завдяки використанню критерія оптимальності, що пов'язаний з мінімізацією виразу (2.58).

## **Б.2. Проміжні результати дослідження процесів QoE-маршрутизації VoIP-потоків за допомогою запропонованих у четвертому розділі тензорних моделей**

Вихідна структура ТКМ, на якій моделювалось розв'язання задачі QoE-маршрутизації при диференційованому забезпеченні якості обслуговування за показником R-фактору, представлена на рис. 4.6. Між маршрутизаторами  $R_1$  та  $R_9$  передавались пакети двох VoIP-потоків з інтенсивностями  $\lambda_1^{\langle \text{вим} \rangle} = 180$  1/с та  $\lambda_2^{\langle \text{вим} \rangle} = 300$  1/с. Співвідношення  $f(pr^1)$  до  $f(pr^2)$  складало 20 до 1.

Результати розв'язання задачі QoE-маршрутизації для двох VoIP-потоків в ТКМ (рис. 4.6) представлено в табл. Б.1 та Б.2. Як видно з табл. Б.2, балансування навантаження другого VoIP-потoku здійснюється за чотирма шляхами. Перший VoIP-потів використовує п'ять маршрутів, проте три з яких (другий, третій та п'ятий) використовуються мінімально.

Відповідно до змісту табл. 4.1 користувачі першого VoIP-потoku дуже задоволені, а для другого VoIP-потoku деякі користувачі не задоволені.

**Результати розв'язання задачі QoE-маршрутизації  
двох VoIP-потоків в ТКМ**

№ каналу зв'язку	$\lambda_{i,j}^1$	$r_{i,j}^1$	$\lambda_{i,j}^2$	$r_{i,j}^2$	$\Phi_{i,j}$	$\tau_{i,j}$	$P_{i,j}$
(1, 2)	54,1597	0	183,5840	0	550	3,2	0
(2, 3)	54,0462	0	52,0291	0	180	13,5	0
(1, 4)	125,8403	0	116,4160	0	620	2,6	0
(2, 5)	0,1134	0	131,5409	0,0139	170	26,0	0,0001
(3, 6)	54,0462	0	52,0291	0	200	10,6	0
(4, 5)	125,8363	0	0	0	350	4,5	0
(5, 6)	125,9477	0	0,3953	0	250	8,1	0
(4, 7)	0,0040	0	116,4030	0,0130	150	29,7	0,0001
(5, 8)	0,0020	0	131,1456	0	210	12,7	0
(6, 9)	179,9472	0,0467	52,4108	0,0136	290	17,2	0,0003
(7, 8)	0,0040	0	116,4029	0,0001	180	15,7	0,0000
(8, 9)	0,0060	0,0001	244,0672	3,4813	260	45,3	0,0141

Таблиця Б.2

**Характеристика шляхів, отриманих в процесі розв'язання задачі  
QoE-маршрутизації двох VoIP-потоків в ТКМ**

№ потоку	$\lambda^{(вим)}$ (1/с)	$\lambda^*$ (1/с)	$ P $	Характеристики розрахованих шляхів			$T_a$ (мс)	$P_{pl}$ , %	R
				Маршрут	$\lambda_p$ (1/с)	$\tau_p$ (мс)			
1	180	179,9532	5	$R_1 \rightarrow R_2 \rightarrow R_3 \rightarrow R_6 \rightarrow R_9$	54,0322	44,6	36,1	0,03	92,6284
				$R_1 \rightarrow R_4 \rightarrow R_7 \rightarrow R_8 \rightarrow R_9$	0,004	93,4			
				$R_1 \rightarrow R_2 \rightarrow R_5 \rightarrow R_6 \rightarrow R_9$	0,1134	54,5			
				$R_1 \rightarrow R_4 \rightarrow R_5 \rightarrow R_6 \rightarrow R_9$	125,8016	32,4			
				$R_1 \rightarrow R_4 \rightarrow R_5 \rightarrow R_8 \rightarrow R_9$	0,0020	65,1			
2	300	296,478	4	$R_1 \rightarrow R_2 \rightarrow R_3 \rightarrow R_6 \rightarrow R_9$	52,0156	44,6	82,1	1,17	72,8256
				$R_1 \rightarrow R_4 \rightarrow R_7 \rightarrow R_8 \rightarrow R_9$	114,7659	93,4			
				$R_1 \rightarrow R_2 \rightarrow R_5 \rightarrow R_6 \rightarrow R_9$	0,3952	54,5			
				$R_1 \rightarrow R_2 \rightarrow R_5 \rightarrow R_8 \rightarrow R_9$	129,3013	87,2			

### Б.3. Проміжні результати дослідження процесів швидкої QoE-перемаршрутизації VoIP-потоків за допомогою запропонованих у четвертому розділі тензорних моделей

Вихідна структура ТКМ, на якій моделювалось розв'язання задачі швидкої QoE-перемаршрутизації із забезпеченням якості обслуговування за показником R-фактору, представлена на рис. 4.6. Між маршрутизаторами  $R_1$  та  $R_9$  передавався один VoIP-потік з інтенсивністю  $\lambda^{\langle \text{вим} \rangle} = 150$  1/с. У критерії оптимальності (4.20) використовувалась маршрутна метрика  $10^7 / \varphi_{i,j}$ .

Результати розв'язання поставленої задачі представлені в табл. Б.3 та Б.4. Як видно з табл. Б.3, основне і резервне рішення базувались на реалізації одношляхової маршрутизації.

Таблиця Б.3

#### Результати розв'язання задачі швидкої QoE-перемаршрутизації VoIP-потоків в ТКМ

№ каналу зв'язку	Основний маршрут				Резервний маршрут				$\varphi_{i,j}$
	$\lambda_{i,j}$	$r_{i,j}$	$\tau_{i,j}$	$p_{i,j}$	$\bar{\lambda}_{i,j}$	$\bar{r}_{i,j}$	$\bar{\tau}_{i,j}$	$\bar{p}_{i,j}$	
(1, 2)	0	0	0	0	150	0	2,5	0	550
(2, 3)	0	0	0	0	149,89	0,11	32,6	0,0007	180
(1, 4)	150	0	2,1	0	0	0	0	0	620
(2, 5)	0	0	0	0	0	0	0	0	170
(3, 6)	0	0	0	0	149,89	0	19,9	0	200
(4, 5)	150	0	5	0	0	0	0	0	350
(5, 6)	0	0	0	0	0	0	0	0	250
(4, 7)	0	0	0	0	0	0	0	0	150
(5, 8)	150	0	16,7	0	0	0	0	0	210
(6, 9)	0	0	0	0	149,89	0	7,1	0	290
(7, 8)	0	0	0	0	0	0	0	0	180
(8, 9)	150	0	9,1	0	0	0	0	0	260



Таблиця Б.4

**Характеристика шляхів, отриманих в процесі розв'язання задачі швидкої QoE-перемаршрутизації VoIP-потoku в ТКМ**

Тип шляху	$\lambda^{(вим)}$ (1/с)	$\lambda^*$ (1/с)	Характеристики розрахованих шляхів			$T_a$ (мс)	$P_{pl}$ (%)	$R$
			Маршрут	$\lambda_p$ (1/с)	$\tau_p$ (мс)			
Основний	150	150	$R_1 \rightarrow R_4 \rightarrow R_5 \rightarrow R_8 \rightarrow R_9$	150	32,9	32,9	0	93,1739
Резервний	150	149,8877	$R_1 \rightarrow R_2 \rightarrow R_3 \rightarrow R_6 \rightarrow R_9$	149,8877	62,1	62,1	0,07	91,5749

Відповідно до змісту табл. Б.4 та табл. 4.1 користувачі VoIP-потoku як при використанні основного, так і резервного шляхів, дуже задоволені.

**Б.4. Проміжні результати дослідження процесів швидкої QoE-перемаршрутизації із захистом рівня мультимедійної якості за допомогою запропонованих у четвертому розділі тензорних моделей**

В табл. Б.5 та табл. Б.6 показано порядок швидкої QoE-перемаршрутизації із захистом рівня мультимедійної якості та десятого вузла (рис. 4.21) при використанні основного та резервного мультишляхів відповідно.

**Результати розрахунку основного мультишляху при швидкій  
QoE-перемаршрутизації**

Канал	$\varphi_{i,j}$ , 1/c	$\lambda_{k^{sp}}^{\langle \text{вум} \rangle} = 100$ 1/c, $\lambda_{k^{video}}^{\langle \text{вум} \rangle} = 300$ 1/c, $MMq_{\langle \text{вум} \rangle} = 3,5$				$\tau_{i,j}$ , мс
		Порядок маршрутизації пакетів аудіопотоку		Порядок маршрутизації пакетів відеопотоку		
		$\lambda_{i,j}^{k^{sp}}$ , 1/c	$r_{i,j}^{k^{sp}}$ , 1/c	$\lambda_{i,j}^{k^{video}}$ , 1/c	$r_{i,j}^{k^{video}}$	
(1,2)	320	47,4272	0	142,2816	0	0,0077
(1,5)	340	52,5728	0	157,7184	0	0,0077
(2,3)	200	26,5441	0	79,6322	0	0,0107
(2,6)	190	20,8831	0	62,6494	0	0,0094
(3,4)	195	13,7255	0	41,1765	0	0,0071
(3,7)	215	12,8186	0	38,4557	0	0,0061
(4,8)	190	13,7255	0	41,1765	0	0,0074
(5,6)	180	18,2852	0	54,8556	0	0,0094
(5,9)	220	34,2876	0	102,8628	0	0,0121
(6,7)	190	13,5949	0	40,7846	0	0,0074
(6,10)	200	25,5734	0	76,7204	0	0,0102
(7,8)	160	10,3515	0	31,0544	0	0,0084
(7,11)	175	16,062	0	48,1859	0	0,0090
(8,12)	185	24,077	0	72,2309	0	0,0113
(9,10)	210	19,2681	0	51,8043	0	0,0075
(9,13)	210	15,0195	0	45,0585	0	0,0067
(10,11)	260	24,4676	0	73,4028	0	0,0062
(10,14)	260	20,3739	0	61,1219	0	0,0056
(11,12)	190	24,0872	0	72,2616	0	0,0107
(11,15)	170	16,4424	0	49,3271	0	0,0096
(12,16)	260	48,1626	0,0016	144,4878	0,0047	0,0148
(13,14)	215	15,0195	0	45,0585	0	0,0065
(14,15)	240	35,3934	0	106,1804	0	0,0102
(15,16)	270	51,8314	0,0044	155,4944	0,0131	0,0159

**Результати розрахунку резервного мультишляху при швидкій  
QoE-перемаршрутизації**

Канал	$\varphi_{i,j}$ , 1/с	$\lambda_{k^{sp}}^{\langle \text{вим} \rangle} = 100$ 1/с, $\lambda_{k^{video}}^{\langle \text{вим} \rangle} = 300$ 1/с, $MMq_{\langle \text{вим} \rangle} = 3,5$				$\tau_{i,j}$ , мс
		Порядок маршрутизації пакетів аудіопотоку		Порядок маршрутизації пакетів відеопотоку		
		$\bar{\lambda}_{i,j}^{k^{sp}}$ , 1/с	$\bar{r}_{i,j}^{k^{sp}}$ , 1/с	$\bar{\lambda}_{i,j}^{k^{video}}$ , 1/с	$\bar{r}_{i,j}^{k^{video}}$ , 1/с	
(1,2)	320	48,967	0	146,9009	0	0,0081
(1,5)	340	51,033	0	153,0991	0	0,0074
(2,3)	200	33,938	0,0001	101,8141	0,0003	0,0156
(2,6)	190	15,0289	0	45,0865	0	0,0077
(3,4)	195	17,9097	0	53,7291	0	0,0081
(3,7)	215	16,0283	0	48,085	0	0,0066
(4,8)	190	17,9097	0	53,7291	0	0,0084
(5,6)	180	15,2202	0	45,6607	0	0,0084
(5,9)	220	35,8128	0	107,4383	0,0001	0,0130
(6,7)	190	30,2491	0	90,7472	0	0,0145
(6,10)	0	0	0	0	0	
(7,8)	160	14,8174	0	44,4522	0	0,0099
(7,11)	175	31,4596	0,0004	94,3787	0,0013	0,0203
(8,12)	185	32,7268	0,0003	98,1804	0,0009	0,0185
(9,10)	0	0	0	0	0	
(9,13)	210	35,8127	0,0001	107,4379	0,0004	0,0150
(10,11)	0	0	0	0	0	
(10,14)	0	0	0	0	0	
(11,12)	190	16,5466	0	49,6399	0	0,0081
(11,15)	170	14,913	0	44,7388	0	0,0091
(12,16)	260	49,2705	0,0029	147,8115	0,0088	0,0159
(13,14)	215	35,8126	0,0001	107,7377	0,0002	0,0139
(14,15)	240	35,8126	0	107,4377	0	0,0103
(15,16)	270	50,7232	0,0024	152,1693	0,0072	0,0149

**Б.5. Проміжні результати дослідження методу ієрархічно-координаційної міждоменної QoS-маршрутизації при координації рішень за середньою міжкінцевою затримкою**

На рис. Б.5 показано результат розв'язання задачі QoS-маршрутизації при координації рішень за середньою міжкінцевою затримкою, який отримано на першій ітерації методу, описаного в підрозділі 5.6.

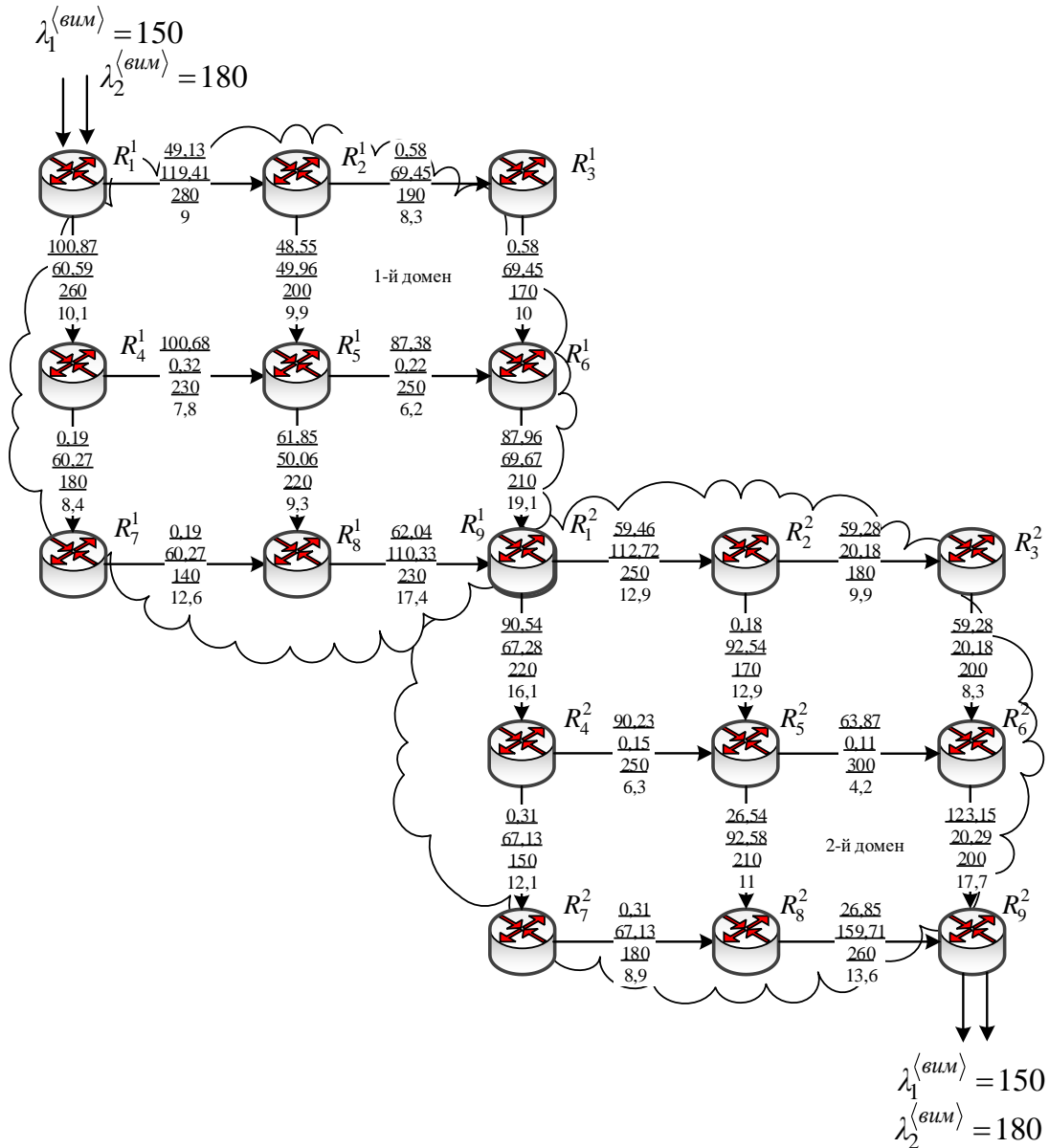


Рис. Б.5. Результат розв'язання задачі QoS-маршрутизації при координації рішень за середньою міжкінцевою затримкою, який отримано на першій ітерації методу, представленого в підрозділі 5.6

На цьому рисунку в розривах каналів зв'язку показано наступні дані (згори до низу): інтенсивність першого потоку пакетів, інтенсивність другого потоку пакетів, пропускна здатність, а також середня затримка пакетів у цьому каналі зв'язку. В табл. Б.7 наведено характеристики розрахованих маршрутів, показаних на рис. Б.5.

Таблиця Б.7

### Характеристики розрахованих маршрутів, показаних на рис. Б.5

№ домену	$\lambda^{(вим)}$ , 1/с	P	Характеристики розрахованих шляхів			$\tau_{MP}^{p,k}$ , мс
			Маршрут	$\lambda_p$ (1/с)	$\tau_p$ , мс	
Для першого потоку пакетів						
1	150	5	$R_1^1 \rightarrow R_2^1 \rightarrow R_3^1 \rightarrow R_6^1 \rightarrow R_9^1$	0,58	46,4	44
			$R_1^1 \rightarrow R_4^1 \rightarrow R_7^1 \rightarrow R_8^1 \rightarrow R_9^1$	0,19	48,4	
			$R_1^1 \rightarrow R_2^1 \rightarrow R_5^1 \rightarrow R_6^1 \rightarrow R_9^1$	48,55	44,1	
			$R_1^1 \rightarrow R_4^1 \rightarrow R_5^1 \rightarrow R_6^1 \rightarrow R_9^1$	43,2	38,83	
			$R_1^1 \rightarrow R_4^1 \rightarrow R_5^1 \rightarrow R_8^1 \rightarrow R_9^1$	61,85	44,5	
2		5	$R_1^1 \rightarrow R_2^1 \rightarrow R_3^1 \rightarrow R_6^1 \rightarrow R_9^1$	59,28	48,8	46,5
			$R_1^1 \rightarrow R_4^1 \rightarrow R_7^1 \rightarrow R_8^1 \rightarrow R_9^1$	0,31	50,7	
			$R_1^1 \rightarrow R_2^1 \rightarrow R_5^1 \rightarrow R_6^1 \rightarrow R_9^1$	0,18	47,7	
			$R_1^1 \rightarrow R_4^1 \rightarrow R_5^1 \rightarrow R_6^1 \rightarrow R_9^1$	63,68	44,3	
			$R_1^1 \rightarrow R_4^1 \rightarrow R_5^1 \rightarrow R_8^1 \rightarrow R_9^1$	26,55	47	
Для другого потоку пакетів						
1	180	5	$R_1^2 \rightarrow R_2^2 \rightarrow R_3^2 \rightarrow R_6^2 \rightarrow R_9^2$	69,45	46,4	46,8
			$R_1^2 \rightarrow R_4^2 \rightarrow R_7^2 \rightarrow R_8^2 \rightarrow R_9^2$	60,27	48,4	
			$R_1^2 \rightarrow R_2^2 \rightarrow R_5^2 \rightarrow R_6^2 \rightarrow R_9^2$	0,21	44,1	
			$R_1^2 \rightarrow R_2^2 \rightarrow R_5^2 \rightarrow R_8^2 \rightarrow R_9^2$	49,75	45,4	
			$R_1^2 \rightarrow R_4^2 \rightarrow R_5^2 \rightarrow R_8^2 \rightarrow R_9^2$	0,32	44,5	
2		5	$R_1^2 \rightarrow R_2^2 \rightarrow R_3^2 \rightarrow R_6^2 \rightarrow R_9^2$	20,18	48,8	50,3
			$R_1^2 \rightarrow R_4^2 \rightarrow R_7^2 \rightarrow R_8^2 \rightarrow R_9^2$	67,13	50,7	
			$R_1^2 \rightarrow R_2^2 \rightarrow R_5^2 \rightarrow R_6^2 \rightarrow R_9^2$	0,11	47,7	
			$R_1^2 \rightarrow R_2^2 \rightarrow R_5^2 \rightarrow R_8^2 \rightarrow R_9^2$	92,43	50,4	
			$R_1^2 \rightarrow R_4^2 \rightarrow R_5^2 \rightarrow R_8^2 \rightarrow R_9^2$	0,15	47	

На першій ітерації координаційної процедури (6.24), (6.25) не забезпечувалось виконання вимог щодо рівня кості обслуговування за середньою міжкінцевою затримкою пакетів для другого потоку, так як  $\tau_{(don)}^2 = 90$  мс, а  $\tau_{MP}^2 = 97,1$  мс (рис. 6.13 а), яка є сумою затримок в доменах – відповідно 46,8 мс та 50,3 мс (табл. Б.7). На рис. Б.6 наведено результат розв’язання задачі QoS-маршрутизації при координації рішень за середньою міжкінцевою затримкою, який отримано на третій (фінальній) ітерації методу, описаного в підрозділі 5.6.

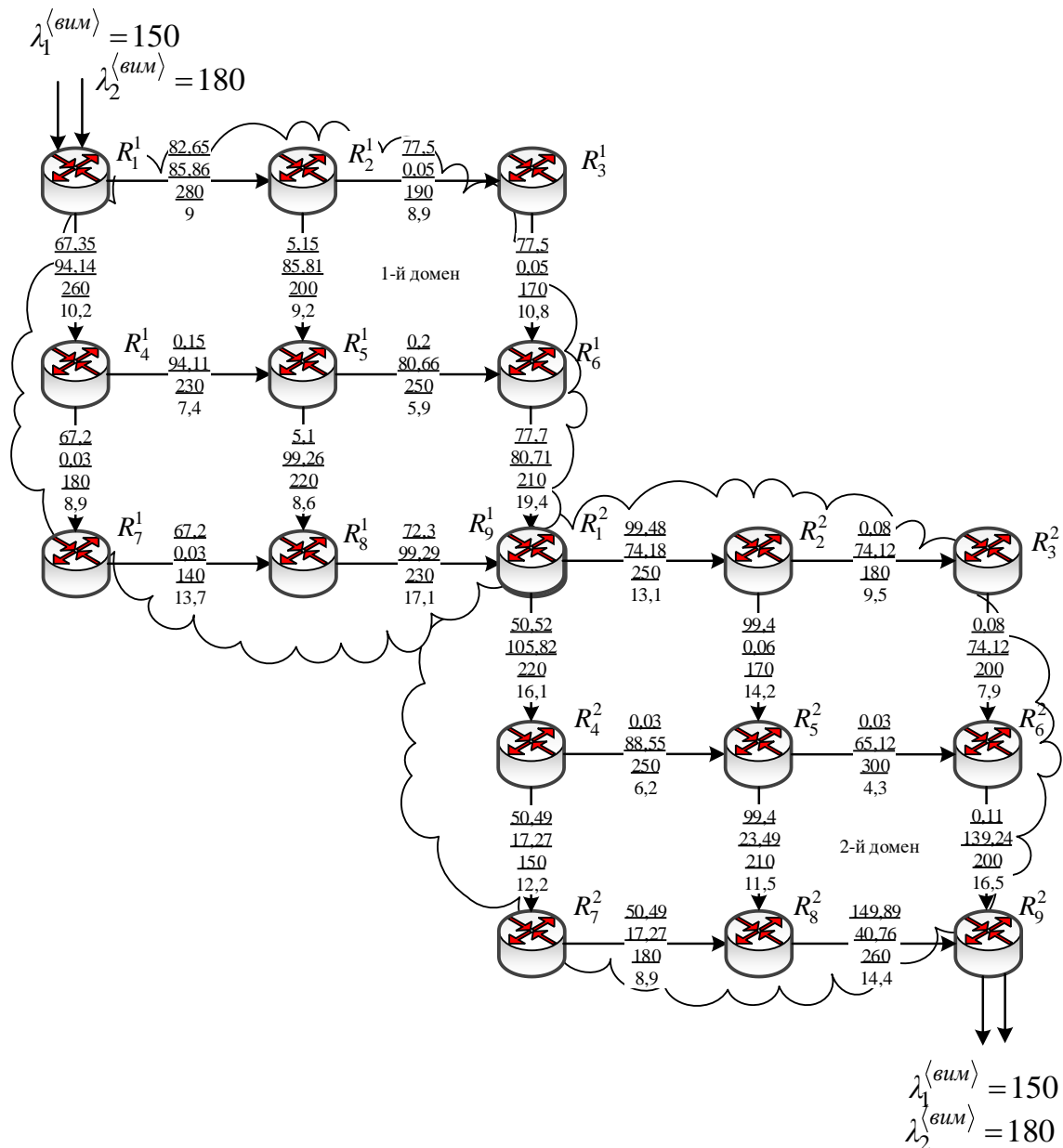


Рис. Б.6. Результат розв’язання задачі QoS-маршрутизації при координації рішень за середньою міжкінцевою затримкою, який отримано на третій ітерації методу, представленого в підрозділі 5.6

Позначення на рис. Б.6 аналогічна до рис. Б.5. В табл. Б.8 наведено характеристики розрахованих маршрутів, показаних на рис. Б.6.

Таблиця Б.8

### Характеристики розрахованих маршрутів, показаних на рис. Б.6

№ домену	$\lambda^{\langle \text{вим} \rangle}$ (1/с)	$ P $	Характеристики розрахованих шляхів			$\tau_{MP}^{p,k}$ (мс)
			Маршрут	$\lambda_p$ (1/с)	$\tau_p$ (мс)	
Для першого потоку пакетів						
1	150	5	$R_1^1 \rightarrow R_2^1 \rightarrow R_3^1 \rightarrow R_6^1 \rightarrow R_9^1$	77,5	48,1	48,7
			$R_1^1 \rightarrow R_4^1 \rightarrow R_7^1 \rightarrow R_8^1 \rightarrow R_9^1$	67,2	49,9	
			$R_1^1 \rightarrow R_2^1 \rightarrow R_5^1 \rightarrow R_6^1 \rightarrow R_9^1$	0,2	43,4	
			$R_1^2 \rightarrow R_2^2 \rightarrow R_5^2 \rightarrow R_8^2 \rightarrow R_9^2$	4,95	43,9	
			$R_1^1 \rightarrow R_4^1 \rightarrow R_5^1 \rightarrow R_8^1 \rightarrow R_9^1$	0,16	43,3	
2		5	$R_1^1 \rightarrow R_2^1 \rightarrow R_3^1 \rightarrow R_6^1 \rightarrow R_9^1$	0,08	47	52,5
			$R_1^1 \rightarrow R_4^1 \rightarrow R_7^1 \rightarrow R_8^1 \rightarrow R_9^1$	50,49	51,2	
			$R_1^1 \rightarrow R_2^1 \rightarrow R_5^1 \rightarrow R_6^1 \rightarrow R_9^1$	0,03	48	
			$R_1^2 \rightarrow R_2^2 \rightarrow R_5^2 \rightarrow R_8^2 \rightarrow R_9^2$	99,37	53,2	
			$R_1^1 \rightarrow R_4^1 \rightarrow R_5^1 \rightarrow R_8^1 \rightarrow R_9^1$	0,03	47,8	
Для другого потоку пакетів						
1	180	5	$R_1^1 \rightarrow R_2^1 \rightarrow R_3^1 \rightarrow R_6^1 \rightarrow R_9^1$	0,49	48,1	43,4
			$R_1^1 \rightarrow R_4^1 \rightarrow R_7^1 \rightarrow R_8^1 \rightarrow R_9^1$	0,03	49,9	
			$R_1^1 \rightarrow R_2^1 \rightarrow R_5^1 \rightarrow R_6^1 \rightarrow R_9^1$	80,66	43,4	
			$R_1^2 \rightarrow R_2^2 \rightarrow R_5^2 \rightarrow R_8^2 \rightarrow R_9^2$	5,14	43,9	
			$R_1^1 \rightarrow R_4^1 \rightarrow R_5^1 \rightarrow R_8^1 \rightarrow R_9^1$	94,11	43,3	
2		5	$R_1^2 \rightarrow R_2^2 \rightarrow R_3^2 \rightarrow R_6^2 \rightarrow R_9^2$	74,13	47	45,9
			$R_1^2 \rightarrow R_4^2 \rightarrow R_7^2 \rightarrow R_8^2 \rightarrow R_9^2$	17,27	51,2	
			$R_1^2 \rightarrow R_2^2 \rightarrow R_5^2 \rightarrow R_6^2 \rightarrow R_9^2$	0,05	48	
			$R_1^1 \rightarrow R_4^1 \rightarrow R_5^1 \rightarrow R_6^1 \rightarrow R_9^1$	65,06	42,7	
			$R_1^1 \rightarrow R_4^1 \rightarrow R_5^1 \rightarrow R_8^1 \rightarrow R_9^1$	23,49	47,8	

Після третьої ітерації координаційної процедури (5.24), (5.25) вдалося забезпечити виконання вимог щодо рівня кості обслуговування за середньою міжкінцевою затримкою пакетів і для першого, і для другого потоку (табл. Б.8).



## ДОДАТОК В

### СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Єременко А. С., Тарики Н., Євдокименко М. А. Оптимизационная модель отказоустойчивой маршрутизации с билинейными условиями защиты пути. *Радиоэлектроника и информатика*. 2017. №2. С. 9–14.
2. Євдокименко М. О., Кравченко Б. Д., Лукова-Чуйко Н. В. Аналіз проблеми забезпечення ефективного балансування навантаження в мережах MPLS-TE. *Проблеми телекомунікацій*. 2017. № 2 (21). С. 32–41. URL: [http://pt.nure.ua/wp-content/uploads/2020/01/172\\_yevdokymenko\\_balancing.pdf](http://pt.nure.ua/wp-content/uploads/2020/01/172_yevdokymenko_balancing.pdf).
3. Lemeshko O., Yevdokymenko M., Naors Y. Anad Alsaleem. Development of the tensor model of multipath QoE-routing in an infocommunication network with providing the required Quality Rating. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. Vol. 5, Issue 2 (95). P. 40–46. DOI: 10.15587/1729-4061.2018.141989 (SCOPUS).
4. Єременко О. С., Євдокименко М. О. Огляд теоретичних рішень щодо відмовостійкої маршрутизації в телекомунікаційних мережах. *Проблеми телекомунікацій*. 2018. № 1 (22). С. 25–42. URL: [http://pt.nure.ua/wp-content/uploads/2020/01/181\\_yeremenko\\_resilience.pdf](http://pt.nure.ua/wp-content/uploads/2020/01/181_yeremenko_resilience.pdf).
5. Lemeshko O., Nevzorova O., Ilyashenko A., Yevdokymenko M. Hierarchical Coordination Method of Inter-Area Routing in Backboneless Network. *Advances in Computer Science for Engineering and Education II. ICCSEEA 2019. Advances in Intelligent Systems and Computing*, Springer, Cham. 2019. Vol. 938. P. 90–102. DOI: 10.1007/978-3-030-16621-2\_9 (SCOPUS)
6. Lemeshko O., Yeremenko O., Yevdokymenko M. MPLS Traffic Engineering Solution of Multipath Fast ReRoute with Local and Bandwidth Protection. *Advances in Computer Science for Engineering and Education II. ICCSEEA 2019. Advances in Intelligent Systems and Computing*, Springer, Cham. 2019. Vol. 938. P. 113–125. DOI: 10.1007/978-3-030-16621-2\_11 (SCOPUS)

7. Невзорова О. С., Євдокименко М. О. Особливості реалізації дворівневого методу маршрутизації на контролері з багатоядерною архітектурою в програмно-конфігурованій мережі. *Проблеми телекомунікацій*. 2018. № 2 (23). С. 75–88. URL: [http://pt.nure.ua/wp-content/uploads/2020/01/182\\_nevzorova\\_multicore.pdf](http://pt.nure.ua/wp-content/uploads/2020/01/182_nevzorova_multicore.pdf).

8. Harkusha S., Lemeshko O., Yevdokymenko M., Yeremenko O. Model of structurally functional selforganization of multi-radio multi-channel mesh networks using hypergraphs. Workshop Proceedings of the 8th International Conference on “Mathematics. Information Technologies. Education”, MoMLeT&DS-2019, Shatsk, Ukraine. 2019. Vol. 2386. P. 75–84. URL: <http://ceur-ws.org/Vol-2386/paper6.pdf> (SCOPUS)

9. Євдокименко М. О., Шаповалова А. С. Метод оцінювання впливу атак на інфокомунікаційну мережу з урахуванням наявних вразливостей. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського*. 2018. Т.29 (68), № 4. С. 67–72. URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/sntuts\\_2018\\_29%2868%29\\_4%281%29\\_\\_14](http://nbuv.gov.ua/UJRN/sntuts_2018_29%2868%29_4%281%29__14)

10. Kuzminykh I., Carlsson A., Yevdokymenko M., Sokolov V. Investigation of the IoT device lifetime with secure data transmission // In: Galinina O., Andreev S., Balandin S., Koucheryavy Y. (eds) Internet of Things, Smart Spaces, and Next Generation Networks and Systems. NEW2AN 2019, ruSMART 2019. Lecture Notes in Computer Science, Springer, Cham. Vol. 11660. P 16–27. DOI: 10.1007/978-3-030-30859-9\_2 (SCOPUS)

11. Yevdokymenko M. O., Shapovalova A. S., Nevzorova O. S. Proactive Approach for Security of the PAAS Model of Cloud System Based on Vulnerability Assessment. *International Journal of Science and Engineering Investigations*. 2019. Vol. 8(91), P. 167–173. URL: <http://www.ijsei.com/papers/ijsei-89119-22.pdf>

12. Лемешко О. В., Шаповалова А. С., Єременко О. С., Євдокименко М. О., Хайлан А. М. Математична модель швидкої перемаршрутизації з балансуванням навантаження та диференційованого обмеження трафіка в мережах SD-WAN. *Системи управління, навігації та зв'язку*. 2019. №4 (56). С. 63–71. DOI:10.26906/SUNZ.2019.4.063.

13. Lemeshko O., Yevdokymenko M., Yeremenko O. Model of data traffic QoS fast rerouting in infocommunication networks. *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*. 2019. № 3 (9), P. 127–134. DOI: 10.30837/2522-9818.2019.9.127.

14. Євдокименко М. О. Метод ієрархічно-координаційної міждоменної маршрутизації у програмно-конфігурованій інфокомунікаційній мережі із забезпеченням нормованої якості обслуговування. *Проблеми телекомунікацій*. 2019. № 2 (25). С. 3–26. URL: [http://pt.nure.ua/wp-content/uploads/2020/02/192\\_yevdokymenko\\_coordination-1.pdf](http://pt.nure.ua/wp-content/uploads/2020/02/192_yevdokymenko_coordination-1.pdf)

15. Lemeshko O., Yeremenko O., Sleiman B., Yevdokymenko M. Fast ReRoute Model with Realization of Path and Bandwidth Protection Scheme in SDN. *Advances in Electrical and Electronic Engineering*. 2020. Vol. 18, № 1. P. 23–30. DOI: 10.15598/aeer.v18i1.3548 (**SCOPUS**)

16. Lemeshko O., Yevdokymenko M., Hu Z., Yeremenko O. Inter-domain routing method under normalized Quality of Service based on hierarchical coordination. *Ceur Workshop Proceedings of the International Workshop on Computer Modeling and Intelligent Systems (CMIS), Zaporizhzhya, ZNTU*. 2020. Vol. 2608. P. 394–408. URL: <http://ceur-ws.org/Vol-2608/paper30.pdf> (**SCOPUS**)

17. Лемешко О. В., Євдокименко М. О. Вдосконалення потокової моделі маршрутизації в мультисервісній телекомунікаційній мережі із забезпеченням якості обслуговування. *Системи озброєння і військова техніка*. 2020. № 1(61). С. 31–43. DOI: 10.30748/soivt.2020.61.04

18. Лемешко О. В., Євдокименко М. О., Єременко О. С. Оптимізаційна модель маршрутизації чутливого до затримок трафіка в інфокомунікаційних мережах. *Збірник наукових праць «Системи управління, навігації та зв'язку»*. 2020. Т. 2 (60). С. 152–159. DOI:10.26906/SUNZ.2020.2.152

19. Лемешко О. В., Євдокименко М. О. Метод ієрархічної міждоменної маршрутизації у програмно-конфігурованій телекомунікаційній мережі із забезпеченням міжкінцевої якості обслуговування. *Сучасний стан наукових*

*досліджень та технологій в промисловості*. 2020. №2(12). С. 169–182. DOI: 10.30837/2522-9818.2020.12.169

20. Lemeshko O., Yevdokymenko M. Advanced tensor approach to fast reroute with quality of service protection under multiple parameters. *Information and Telecommunication Sciences*. 2020. №1. P. 41–52. DOI: 10.20535/2411-2976.12020.41-52

21. Lemeshko O., Yevdokymenko M., Yeremenko O. Fast ReRoute Tensor Model with Quality of Service Protection Under Multiple Parameters. In: Radivilova T., Ageyev D., Kryvinska N. (eds) *Data-Centric Business and Applications. Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies*, Springer, Cham. 2020. Vol. 48. P. 489–512. DOI: 10.1007/978-3-030-43070-2\_22 (**SCOPUS**)

22. Harkusha S., Yevdokymenko M. The Development of Routing Flow Model in IEEE 802.11 Multi-radio Multi-channel Mesh Networks, Shown as a Konig Graph. In: Radivilova T., Ageyev D., Kryvinska N. (eds) *Data-Centric Business and Applications. Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies*, Springer, Cham. Vol. 48. P. 513–528. DOI: 10.1007/978-3-030-43070-2\_23 (**SCOPUS**)

23. Yevdokymenko M. Enhancement of the adaptive routing tensor model in the infocommunication network with providing quality of experience by the R-factor. *Technology Audit and Production Reserves*. 2020. Vol 3, № 2(53). P. 15–22. DOI: 10.15587/2312-8372.2020.20603123

24. Yevdokymenko M. Investigation of Tensor Approach for Providing Multimedia Quality in Infocommunication Networks. *Ceur Workshop Proceedings of the International Workshop on Cyber Hygiene (CybHyg-2019) co-located with 1st International Conference on Cyber Hygiene and Conflict Management in Global Information Networks (CyberConf 2019)*. 2019. Vol. 2654, P. 227–239. URL: <http://ceur-ws.org/Vol-2654/paper18.pdf> (**SCOPUS**)

25. Lemeshko O., Yevdokymenko M., Yeremenko O., Shapovalova A. Investigation of Load-Balancing Fast ReRouting Model with Providing Fair Priority-Based Traffic Policing. In: Hu Z., Petoukhov S., Dychka I., He M. (eds) *Advances in Computer Science for Engineering and Education III. ICCSEEA 2020. Advances in*

Intelligent Systems and Computing. Springer, Cham. 2020. Vol. 1247. P. 108–119  
DOI: 10.1007/978-3-030-55506-1\_10 (**SCOPUS**)

26. Lemeshko O., Yeremenko O., Yevdokymenko M., Hailan A. M. Tensor Multiflow Routing Model to Ensure the Guaranteed Quality of Service Based on Load Balancing in Network. In: Hu Z., Petoukhov S., Dychka I., He M. (eds) *Advances in Computer Science for Engineering and Education III. ICCSEEA 2020. Advances in Intelligent Systems and Computing*. Springer, Cham. 2020. Vol. 1247. P. 120–131. DOI: 10.1007/978-3-030-55506-1\_11 (**SCOPUS**)

27. Lemeshko O., Yeremenko O., Hailan A.M., Yevdokymenko M., Shapovalova A. Policing Based Traffic Engineering Fast ReRoute in SD-WAN Architectures: Approach Development and Investigation. In: Al-Bakry A. et al. (eds) *New Trends in Information and Communications Technology Applications. NTICT 2020. Communications in Computer and Information Science*. Springer, Cham. Vol. 1183. P. 29–43. DOI: 10.1007/978-3-030-55340-1\_3 (**SCOPUS**)

28. Єременко О. С., Євдокименко М. О., Слейман Б. Удосконалена модель швидкої перемаршрутизації з реалізацією схеми захисту шляху та пропускнуої здатності в програмно-конфігурованих мережах. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2020. № 1 (11). С. 163–171. DOI: 10.30837/2522-9818.2020.11.163.

29. Harkusha S., Harkusha O., Ievdokymenko M. Hypergraph representations of topological model mesh-network IEEE 802.11. *Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science (TCSET): Proceedings of the 13th International Conference*. Lviv, 2016. IEEE, 2016. P. 876–878, DOI: 10.1109/TCSET.2016.7452212. (**SCOPUS**)

30. Yevdokymenko M. An adaptive algorithm for detecting and preventing attacks in telecommunication networks. *Problems of Infocommunications Science and Technology (PIC S&T): Proceedings of the Third International Scientific-Practical Conference*, Kharkiv, Ukraine, 4–6 Oct. 2016. IEEE, 2016. P. 175–177. DOI: 10.1109/INFOCOMMST.2016.7905373 (**SCOPUS**)

31. Lebedenko T., Ievdokymenko M., Ali Salem Ali. Research of Influence Flow Characteristics to Network Routers Queues Utilization. *1st International Conference Advanced Information and Communication Technologies*. Lviv, Ukraine, 2015. P. 111–112.

32. Євдокименко М. О., Маянгані Ж. М. Інтелектуальні методи захисту інформації в телекомунікаційних мережах. «Новітні технології – для захисту повітряного простору»: матеріали 13-ої наукової конференції Харківського національного університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба (м. Харків, 2017). Харків: ХНУПС ім. І. Кожедуба, 2017. С. 25.

33. Євдокименко М. О., Єременко О. С. Аналіз легковагових криптографічних алгоритмів для безпечної передачі даних між кінцевими пристроями з обмеженими ресурсами в системі Інтернет речей. *Проблеми електромагнітної сумісності перспективних безпроводових мереж зв'язку (EMC-2019)*: Збірник наукових праць третьої міжнародної науково-технічної конференції (м. Харків, 2017). Харків: ХНУРЕ, 2017. С. 86–88.

34. Yevdokymenko M., Elsayed Mohamed, Paul Onwuakpa. Ethical hacking and penetration testing using raspberry PI. *Problems of Infocommunications Science and Technology (PIC S&T)*: Proceedings of the Fourth International Scientific-Practical Conference, Kharkov, Ukraine, 10–13 October, 2017. IEEE, 2017. P. 179–181. DOI: 10.1109/INFOCOMMST.2017.8246375. (SCOPUS)

35. Yevdokymenko M., Manasse M., Zalushniy D., Sleiman B. Analysis of Methods for Assessing the Reliability and Security of Infocommunication Network. *Problems of Infocommunications Science and Technology (PIC S&T)*: Proceedings of the Fourth International Scientific-Practical Conference, Kharkov, Ukraine, 10–13 October, 2017. IEEE, 2017. P. 199–202. DOI: 10.1109/INFOCOMMST.2017.8246379. (SCOPUS)

36. Yeremenko O., Yevdokymenko M., Persikov A. Flow-aware approach of evaluating probability of compromise in combined structure network. *Advanced Information and Communication Technologies (AICT)*: Proceedings of the 2nd

International Conference, Lviv, Ukraine, 4–7 July, 2017. IEEE, 2017. P. 258–261. DOI: 10.1109/AIACT.2017.8020114. (SCOPUS)

37. Lemeshko O., Yevsieieva O., Yevdokymenko M. Tensor Flow-Based Model of Quality of Experience Routing. *Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET): Proceedings of the 14th International Conference, Lviv-Slavske, Ukraine, 20–24 February, 2018*. IEEE, 2018. P. 1005-1008. DOI: 10.1109/TCSET.2018.8336364. (SCOPUS)

38. Лемешко О.В., Євдокименко М.О. Тензорна модель забезпечення якості сприймання користувачами мультимедійного потоку. *XII Міжнародна науково-технічна конференція «Проблеми телекомунікацій» ПТ-2018: збірник матеріалів конференції* (м. Київ, 2018). Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. С. 89–91.

39. Lemeshko O., Yeremenko O., Yevdokymenko M. Tensor Model of Fault-Tolerant QoS Routing with Support of Bandwidth and Delay Protection. *Computer Sciences and Information Technologies (CSIT): Proceedings of the XIIIth International Scientific and Technical Conference, Lviv, Ukraine, 5–8 Sept. 2018*. IEEE, 2018. P. 135-138. DOI: 10.1109/STC-CSIT.2018.8526707. (SCOPUS)

40. Lemeshko O., Yevdokymenko M., Yeremenko O., Hailan A. Tensor QoE-based Routing Model with Evaluation of the Quality Rating. *Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics (UkrMiCo): Proceedings of the International Conference, Odessa, Ukraine, 10-14 September, 2018*. IEEE, 2018. P. 1–4. DOI: 10.1109/UkrMiCo43733.2018.9047545. (SCOPUS)

41. Lemeshko O., Al-Dulaimi A.M.K., Yeremenko O., Yevdokymenko M. Comparative Analysis of Solutions for Management of Time-Frequency Resource in LTE Downlink. *Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems (IDAACS): Proceeding of the 4th IEEE International Symposium on Wireless Systems within the International Conferences, Lviv, Ukraine, 20-21 September, 2018*. IEEE, 2018. P.108–111. DOI: 10.1109/IDAACS-SWS.2018.8525626. (SCOPUS)

42. Yevdokymenko M., Sleiman B., Harkusha S., and Harkusha O. Method of fault tolerance evaluation in conditions of destabilizing factors influence in infocommunication network. *Problems of Infocommunications Science and*

*Technology (PIC S&T): Proceedings of the Fifth International Scientific-Practical Conference, Kharkov, Ukraine, 9-12 October 2018. IEEE, 2018. P. 571–574. DOI: 10.1109/INFOCOMMST.2018.8632077. (SCOPUS)*

43. Yevdokymenko M., Shapovalova A., Voloshchuk O., Carlsson A. Proactive Approach for Security of the Infocommunication Network Based on Vulnerability Assessment. *Problems of Infocommunications Science and Technology (PIC S&T): Proceedings of the Fifth International Scientific-Practical Conference, Kharkov, Ukraine, 9-12 October 2018. IEEE, 2018. P. 609–612. DOI: 10.1109/INFOCOMMST.2018.8632079. (SCOPUS)*

44. Лемешко О. В., Євдокименко М. О., Єременко О. С. Поточкова модель швидкої перемаршрутизації із захистом рівня обслуговування за показниками пропускної здатності та ймовірності втрат. *Фізико-технологічні проблеми передавання, оброблення та зберігання інформації в інфокомунікаційних системах: Матеріали VII-ої міжнародної науково-практичної конференції. (м. Чернівці, 2018). Чернівці: «Місто», 2018. С. 18–20.*

45. Lemeshko O., Yevdokymenko M., Yeremenko O., Hailan A.M., Segeč P., Papán J. Design of the Fast ReRoute QoS Protection Scheme for Bandwidth and Probability of Packet Loss in Software-Defined WAN. *The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronic (CADSM): Proceedings of the 15th International Conference, Polyana-Svalyava (Zakarpattya), Ukraine, 26 February – 2 March, 2019. P. 3/72–3/76. DOI: 10.1109/CADSM.2019.8779321. (SCOPUS)*

46. Лемешко О. В., Євдокименко М. О., Єременко О. С., Мерсні А. Модель швидкої перемаршрутизації із захистом рівня QoS у телекомунікаційній мережі. *XIII Міжнародна науково-технічна конференція «Проблеми телекомунікацій» ІТТ-2019: збірник матеріалів конференції (м. Київ, 2019). Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. С. 138–140.*

47. Lemeshko O. V., Yeremenko O. S., Yevdokymenko M. O., Shapovalova A. S. Advanced solution of the Fast ReRoute based on principles of Traffic Engineering and Traffic Policing. *Science and Technology «AVIA-2019»: Proceedings of the Fourteenth International Conference, Ukraine, 23-25 April, 2019. P. 8.21–8.23.*



48. Єременко О. С., Євдокименко М. О., Шаповалова А. С. Підвищення відмовостійкості мереж засобами швидкої перемаршрутизації з балансуванням навантаження та профілюванням трафіка. *Третя міжнародна науково-технічна конференція «Комп'ютерні та інформаційні системи і технології»*: збірник наукових праць. (м. Харків, 2019). Харків: ХНУРЕ, 2019. С. 131.

49. Євдокименко М. О., Єременко О. С., Слейман Б. Тензорна модель швидкої перемаршрутизації із захистом рівня якості обслуговування. *Третя міжнародна науково-технічна конференція «Комп'ютерні та інформаційні системи і технології»*: збірник наукових праць. (м. Харків, 2019). Харків: ХНУРЕ, 2019. С. 132.

50. Лемешко О.В., Єременко О.С., Євдокименко М.О., Слейман Б. Модель розрахунку множини маршрутів, що не перетинаються, з максимальною пропускною здатністю в MANET. *Проблеми електромагнітної сумісності перспективних безпроводових мереж зв'язку (EMC-2019)*: Збірник наукових праць четвертої міжнародної науково-технічної конференції (м. Харків, 2019). Харків: ХНУРЕ, 2019. С. 75–76.

51. Lemeshko O., Yevdokymenko M., Yeremenko O., Mersni A., Segeč P., Papán J. Quality of Service Protection Scheme under Fast ReRoute and Traffic Policing Based on Tensor Model of Multiservice Network. *Information and Digital Technologies (IDT 2019)*: Proceedings of the International Conference, 25 – 27 June 2019. Zilina, Slovakia. IEEE, 2019. P. 288–295, DOI: 10.1109/DT.2019.8813675. **(SCOPUS)**

52. Lemeshko O., Yeremenko O., Yevdokymenko M., Shapovalova A., Ilyashenko A., Sleiman B. Traffic Engineering Fast ReRoute Model with Support of Policing. *Electrical and Computer Engineering (UKRCON)*: Proceedings of the 2nd International Conference, Lviv, Ukraine, 2 – 6 July, 2019. IEEE, 2019. P. 842–845. DOI: 10.1109/UKRCON.2019.8880006. **(SCOPUS)**

53. Lemeshko O., Yevdokymenko M., Yeremenko O., Nevzorova O., Snihurov A., Kovalenko T. Fast ReRoute Model with VoIP Quality of Experience Protection. *Advanced Information and Communication Technologies (AICT)*: Proceedings of the

3rd International Conference, Lviv, Ukraine, 3 – 6 July, 2019. IEEE, 2019. P. 16-21, DOI: 10.1109/AIACT.2019.8847918. **(SCOPUS)**

54. Lemeshko O., Yeremenko O., Yevdokymenko M., Sleiman B., Hailan A.M., Mersni A. Computation Method of Disjoint Paths under Maximum Bandwidth Criterion. *Advanced Information and Communication Technologies (AICT): Proceedings of the 3rd International Conference, Lviv, Ukraine, 3 – 6 July, 2019. IEEE, 2019. P. 161-164, DOI: 10.1109/AIACT.2019.8847756. (SCOPUS)*

55. Lemeshko O., Yeremenko O., Yevdokymenko M., Sleiman B. Improvement of the Calculation Model the Set of Disjoint Paths with Maximum Bandwidth. *Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics (UkrMiCo): Proceedings of the Fourth International Conference, Odessa, Ukraine, 9 – 13 September, 2019. IEEE, 2019. P. 1–4. DOI: 10.1109/UkrMiCo47782.2019.9165311. (SCOPUS)*

56. Lemeshko O., Yeremenko O., Yevdokymenko M., Shapovalova A., Hailan A. M., Mersni A. Cyber Resilience Approach Based on Traffic Engineering Fast ReRoute with Policing. *Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS): Proceedings of the 10th IEEE International Conference, Metz, France, 2019. IEEE, 2019. P. 117–122. DOI: 10.1109/IDAACS.2019.8924294. (SCOPUS)*

57. Yevdokymenko M. Routing Tensor Model with Providing Multimedia Quality. *Problems of Infocommunications Science and Technology (PIC S&T): Proceedings of the Sixth International Scientific-Practical Conference, Kyiv, Ukraine, 2019. IEEE, 2019. P. 819–824. DOI: 10.1109/PICST47496.2019.9061280. (SCOPUS)*

58. Lemeshko O., Yevdokymenko M., Yeremenko O. Load-Balancing Fast ReRouting Model with Providing Fair Priority-Based Traffic Policing. *Problems of Infocommunications Science and Technology (PIC S&T): Proceedings of the Sixth International Scientific-Practical Conference, Kyiv, Ukraine, 2019. IEEE, 2019. P. 538–542. DOI: 10.1109/PICST47496.2019.9061303. (SCOPUS)*

59. Lemeshko O., Yeremenko O., Yevdokymenko M., Sleiman B. Enhanced Solution of the Disjoint Paths Set Calculation for Secure QoS Routing. *Advanced Trends in Information Theory (ATIT): Proceedings of the International Conference, Kyiv, Ukraine, 2019.* IEEE, 2019. P. 210–213. DOI: 10.1109/ATIT49449.2019.9030520. **(SCOPUS)**

60. Kuzminykh I., Yevdokymenko M. Analysis of Security of Rootkit Detection Methods *Advanced Trends in Information Theory (ATIT): Proceedings of the International Conference, Kyiv, Ukraine, 2019.* IEEE, 2019. P. 196–199. DOI: 10.1109/ATIT49449.2019.9030428. **(SCOPUS)**

61. Lemeshko O., Yevdokymenko M., Yeremenko O. Fast ReRoute Model with MultiMedia Quality Protection. *Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science (TCSET): Proceedings of the 15th International Conference, Lviv, Ukraine, 25-29 February, 2020.* IEEE, 2020. P. 287–292. DOI: 10.1109/TCSET49122.2020.235441. **(SCOPUS)**

62. Lemeshko O., Yeremenko O., Yevdokymenko M., Hailan A.M. Tensor Based Load Balancing under Self-Similar Traffic Properties with Guaranteed QoS. *Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science (TCSET): Proceedings of the 15th International Conference, Lviv, Ukraine, 25-29 February, 2020.* IEEE, 2020. P. 293–297, DOI: 10.1109/TCSET49122.2020.235442. **(SCOPUS)**

63. Lemeshko O., Yevdokymenko M., Yeremenko O. Method of Hierarchical QoS-Routing in Software-Defined Networks. *Computer and Information Systems and Technologies: Proceedings of Fourth International Scientific and Technical Conference, Kharkiv, Ukraine. 2020.* P. 81. DOI: 10.30837/IVcsitic2020201455.

64. Yeremenko O., Yevdokymenko M., Sleiman, B., Olayinka Omowumi Stephen. Fast ReRouting Flow-based Model with Implementation of Path Protection. *Computer and Information Systems and Technologies: Proceedings of the Fourth International Scientific and Technical Conference, Kharkiv, Ukraine. 2020.* P. 83. DOI: 10.30837/IVcsitic2020201458

65. Lemeshko O., Yeremenko O., Yevdokymenko M., Sleiman B., Segec P., Papan J. Advanced Performance-Based Fast Re-Routing Model with Path Protection.

*Dependable Systems, Services and Technologies (DESSERT'2020):* Proceedings of the 11th International Conference. Kyiv, Ukraine, 2020. IEEE, 2020. P. 23-28. DOI: 10.1109/DESSERT50317.2020.9125034. (**SCOPUS**).