

Міністерство освіти і науки України  
Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського

Кваліфікаційна  
наукова праця  
на правах рукопису

**ДАВИДОВСЬКИЙ ЮРІЙ КОСТЯНТИНОВИЧ**

УДК 004.94+519.673

**ДИСЕРТАЦІЯ**

**МОДЕЛІ ТА МЕТОДИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ  
ПРИ ФОРМУВАННІ СКЛАДУ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ ПОСЛУГ  
З УРАХУВАННЯМ СТРУКТУРИ МЕРЕЖІ**

122 - Комп'ютерні науки

12 - Інформаційні технології

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

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

\_\_\_\_\_Ю.К. Давидовський  
підпис

Науковий керівник :

Малєєва Ольга Володимирівна,  
професор, доктор технічних наук

Харків – 2023

## АНОТАЦІЯ

*Давидовський Ю.К.* **Моделі та методи прийняття рішень при формуванні складу телекомунікаційних послуг з урахуванням структури мережі.** – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 122 «Комп'ютерні науки». – Національний аерокосмічний університет ім. М.Є. Жуковського «ХАІ», Харків, 2023.

Загострення конкуренції в індустрії телекомунікаційних послуг в Україні обумовлює для операторів зв'язку завдання утримання та укріплення позицій на цьому ринку. Для цього необхідно проводити аналіз конкурентоспроможності телекомунікаційних послуг, що надаються споживачам, приймати рішення щодо їх розширення або поліпшення якості відповідно до нових технологій зв'язку та технічного розвитку мережевого обладнання.

Наразі спостерігаються масштабні зміни у щоденній людській діяльності, насамперед мається на увазі зростання людської активності у мережі Internet, або використання локальних, корпоративних мереж. Популярність інтернет телефонії зумовила перехід до впровадження таких сервісів як відеоконференції. Сьогодні новітні комунікаційні сервіси, які пропонують оператори телекомунікацій, стосуються саме Інтернету, можливостей передачі звуку й відео високої якості. Необхідність прийняття рішень щодо впровадження нових телекомунікаційних послуг обумовлена прагненням отримати суттєвий прибуток для операторів зв'язку за умови збільшення кількості абонентів. З іншої сторони існує проблема попередньої оцінки можливості та результатів впровадження нових послуг.

Аналіз обсягів трафіку комп'ютерних мереж показує десятикратну динаміку його зростання за останнє десятиліття, при цьому тренд до зростання збільшується з року в рік. Було запропоновано велику кількість нових інтернет-сервісів, які потребують великої кількості мережевих ресурсів. Популярність

веб-сервісів в першу чергу зумовлена їх кроссплатформенністю і тим, що вони набагато «легші» з точки зору апаратних складових комп'ютерів, або смартфонів.

Та незважаючи на вже існуючий величезний ринок ІТ послуг у сфері телекомунікацій, ще досі існує багато невирішених концептуальних проблем. Однією з найважливіших серед них є оптимізація ресурсів компаній-провайдерів при побудові нових, або зміні існуючих топологій мереж. Будь яка модернізація мережі є складним та коштовним процесом, тому вирішення завдання зменшення вартості модернізації мережі є життєво необхідним для будь якого бізнесу, який бажає оптимізувати свої витрати. В умовах сьогодення вказана проблема вирішується опираючись тільки на досвід спеціалістів та без допомоги формалізованих методів, алгоритмів та інформаційних технологій.

Таким чином, розробка методів та моделей аналізу і модернізації структури комп'ютерної мережі для забезпечення якості сучасних телекомунікаційних послуг, є актуальною науково-прикладною задачею.

Об'єктом дослідження є процеси аналізу та модернізації структури комп'ютерних мереж.

Предметом дослідження є моделі, методи та інформаційна технологія моделювання комп'ютерних мереж для прийняття рішень з формування складу телекомунікаційних послуг.

Метою дисертаційного дослідження є підвищення обґрунтованості прийняття рішень з формування складу телекомунікаційних послуг на основі результатів імітаційного моделювання структури комп'ютерної мережі для оцінки її основних параметрів.

Для досягнення зазначеної мети були поставлені та вирішені такі завдання:

1. Проаналізувати проблеми надання телекомунікаційних послуг та тенденції зростання вхідного трафіку в комп'ютерних мережах.

2. Розробити метод прийняття рішень з формування складу телекомунікаційних послуг з урахуванням вхідного трафіку та структури комп'ютерної мережі.

3. Розробити метод моделювання та оцінки параметрів комп'ютерної мережі.

4. Розробити розрахункову модель для виявлення перевантажень в мережі.

5. Розробити прикладну інформаційну технологію імітаційного моделювання комп'ютерної мережі.

6. Впровадити результати дисертаційного дослідження в практику надання телекомунікаційних послуг та модернізації комп'ютерних мереж.

Науковою новизною дисертації є:

1. Вперше розроблено метод оцінювання параметрів комп'ютерної мережі, який на відміну від існуючих, оснований на моделюванні її структури з урахуванням фрактальних властивостей трафіку, що дозволить обґрунтувати прийняття рішення щодо впровадження нових послуг.

2. Удосконалено метод прийняття рішень з управління процесами надання телекомунікаційних послуг, шляхом прогнозування обсягу вхідного потоку та моделювання структури комп'ютерної мережі.

3. Набула подальшого розвитку модель оцінки навантаження в комп'ютерній мережі шляхом емуляції механізму ковзаючого вікна, що дозволяє виявити перевантаження в процесі імітаційного моделювання мережі.

4. Набула подальшого розвитку прикладна інформаційна технологія моделювання комп'ютерної мережі шляхом створення імітаційної моделі дослідження її структури, що надає змогу оцінювати основні показники мережі для обґрунтування рішень щодо впровадження нових послуг.

У першому розділі проведено розгляд стану індустрії інтернет телекомунікацій на сьогоднішній день, а також проблем, які виникають через безперервний розвиток сервісів та збільшення кількості абонентів. Проаналізовано чинники впливу зовнішнього середовища на функціонування

комп'ютерних мереж. Звіти компаній Ericsson та Cisco демонструють теперішнє та прогнозоване навантаження на мережі передачі даних у різних перспективах, в тому числі, із категоризацією за типами наданих послуг та сервісів.

Розглянута концептуальна основа та досліджено розвиток методів модернізації комп'ютерних мереж. Зроблено висновок про необхідність приймати ефективні рішення щодо вибору стратегій розвитку мережі для максимального використання її ресурсів. Структура комп'ютерної мережі є основним чинником, що впливає на якість передавання даних до абонента, і, відповідно, на якість телекомунікаційних послуг.

Досліджено роль моделювання в прогнозуванні характеристик комп'ютерних мереж і зроблено висновок, що важливим завданням є статистичний аналіз даних про обсяг трафіку з різних мереж за різні періоди часу.

У другому розділі розглянуто основні параметри якості телекомунікаційних послуг, які відображають можливість і ефективність транспортування інформації в комп'ютерній мережі. Зроблено висновок, що відповідно до вимог абонентів щодо якості телекомунікаційних послуг здійснюється формування структури мережі, вибір транспортних протоколів, апаратного та програмного забезпечення. Таким чином для надання якісних телекомунікаційних послуг треба гарантувати високу пропускну здатність, швидкий час реакції мережі та інші параметри.

В результаті дослідження міжнародного трафіку на схожість та самоподібність за допомогою низки статистичних критеріїв доведено добову періодичність протягом певного періоду часу. Також підтверджено гіпотезу про незалежність мережевої динаміки від конкретного місцезнаходження комп'ютерної мережі та її розміру. Шляхом побудови авторегресійної моделі часового ряду за даними спостережень впродовж місяця доведена періодичність ряду з лагом, що становить 24 години.

Розглянуто стратегії розвитку сучасних операторів зв'язку, що викликані зростаючими обсягами та неоднорідністю трафіку телекомунікаційних мереж. Розроблено модель синергетичного мережевого ефекту в умовах об'єднання операторів.

В результаті розроблено метод прийняття рішень з управління процесами надання телекомунікаційних послуг на основі результатів прогнозування обсягу вхідного потоку та моделювання структури комп'ютерної мережі.

У третьому розділі запропонований метод оцінювання параметрів комп'ютерної мережі на основі моделювання, оптимізації та перебудови структури мережі. Цей метод складається з декількох алгоритмів, які дозволяють перетворити існуючу структуру комп'ютерної мережі у квазіоднорідну структуру, що значно підвищить її ефективність за рахунок збереження коштів на надлишкові канали зв'язку, та дозволить використати вже наявні ресурси. Шляхом імітаційного моделювання комп'ютерної мережі на базі спостережень та алгоритмів роботи нижніх рівнів моделі OSI, з'явилася можливість дати відповіді на наступні питання: чи буде структура мережі стабільною, чи увесь спектр обладнання буде використовуватися з максимальним навантаженням, та чи оператор не втратить прибуток.

Додано розрахункову модель транспортного рівня комп'ютерної мережі. Вона реалізована у вигляді емуляції механізму ковзаючого вікна для перерозподілу трафіку, який не може бути переданий на певній ітерації моделі через низьку пропускну здатність мережі, зависокі вимоги на передачу даних, тощо.

Запропонований метод, а також його подальша реалізація у вигляді інформаційні технології моделювання дозволить суттєво зменшити вартість та спростити процес модернізації комп'ютерної мережі.

У четвертому розділі сформована архітектура прикладної інформаційної технології для моделювання поведінки комп'ютерної мережі на базі мікросервісів, з урахуванням потенційних можливостей для горизонтального масштабування аналітичних можливостей системи.

Підтверджена адекватність розроблених методу та моделей на базі практичних розрахунків тестового прикладу. Розглянуто процедуру модернізації мережі із застосуванням інформаційної технології для моделювання поведінки мережі. Розглянута можливість знаходження мінімально допустимого впливу на мережу для досягнення максимально можливого збільшення QoS, для економії часу та коштів під час модернізації комп'ютерної мережі. Виділений напрям покращення моделі шляхом додавання окремого модулю, який пропонує можливі зміни, де кількість змін та кількість відкладених ітерацій передачі даних прагне до нуля

Таким чином, сукупність запропонованих в роботі методу та моделей була реалізована програмно і підтверджено адекватність отриманих результатів моделювання. Розроблена прикладна інформаційна технологія моделювання комп'ютерної мережі шляхом створення імітаційної моделі дослідження її структури, яка надає змогу оцінювати основні показники мережі для обґрунтування рішень щодо впровадження нових телекомунікаційних послуг.

В результаті виконання роботи було розроблено методи та моделі, які дозволили розширити методологічний апарат прийняття рішень з управління послугами телекомунікаційних операторів. Практичною цінністю розробленої інформаційної технології є можливість спрогнозувати «вузькі місця» під час модернізації комп'ютерної мережі, або навпаки - вказати на надмірність певних рішень, щоб у перспективі зекономити значні кошти провайдерів та операторів послуг зв'язку.

Результати роботи впроваджено в Національному аерокосмічному університеті ім. М.Є. Жуковського «ХАІ», та у телекомунікаційній компанії ТОВ «НПК «ХОУМ-НЕТ» (м.Київ). Запропоновані методи, моделі та інформаційна технологія мають практичну значущість та можуть бути повною мірою впроваджені в телекомунікаційних компаніях операторами зв'язку та провайдерами інтернет-послуг як регіонального так і місцевого рівня

*Ключові слова:* імітаційна модель; інформаційна технологія, комп'ютерна мережа, прийняття стратегічних рішень, прогнозна оцінка, трафік, поведінка мережі, маршрутизація; оптимізація.

## СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

Публікації здобувача за темою дисертації, в яких опубліковані основні наукові результати:

1. Давидовський, Ю. К., Малєєва, О. В., Косенко, В. В. & Персіянова О. Ю. (2018). Моделювання процесів перерозподілу трафіка в мережах передачі даних. *Математичні моделі та новітні технології управління економічними та технічними системами*: монографія. За заг. ред В. О. Тімофєєва, І. В. Чумаченко, Харків: ФОП Панов А. М., 261 - 270. ISBN 978-617-7541-98-0
2. Рева, О. А., & Давидовський, Ю. К. (2018). Розробка методики модернізації топології мережі для отримання квазіоднорідної структури. *Радіоелектронні і комп'ютерні системи*, 0(2), 43-51. <https://doi.org/10.32620/reks.2018.2.05>
3. Давидовський, Ю., Рева, О., & Малєєва, О. (2018). Метод моделювання параметрів мережі передачі даних для її модернізації. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*, (4(6), 15-22. <http://dx.doi.org/10.30837/2522-9818.2018.6.015>
4. Davydovskiy, Y., Reva, O., Artiukh, O., & Kosenko, V. (2019). Simulation of computer network load parameters over a given period of time. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*, (3 (9), 72–80. <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2019.9.072>
5. Davydovskiy, Y., Reva, O., Malyeyeva, O., & Kosenko, V. (2020). Application of the sliding window mechanism in simulation of computer network loading parameters. *Сучасні інформаційні системи*, 4(1), 16–22. <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2020.1.03>



6. Malyeyeva, O., Kosenko, V., Davydovskyi, Y., & Boiev, D. (2020). Factor synergy analysis and merger strategy models in investigation of telecommunication operators' performance. *Сучасні інформаційні системи*, 4(2), 130–136. <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2020.2.19>

7. Smidovych, L., & Davydovskyi, Y. (2022). Processes of the telecom operator's information architecture transformation. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*, (1 (19)), 47–54. <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2022.19.047>.

8. Malyeyeva, O., Davydovskyi, Y., & Kosenko V. (2019). Statistical analysis of data on the traffic intensity of Internet networks for the different periods of time. *Second International Workshop on Computer Modeling and Intelligent Systems (CMIS-2019)*, 897-910. ISSN 1613-0073. <https://ceur-ws.org/Vol-2353/paper71.pdf>

Публікації здобувача за темою дисертації, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

1. Малєєва, О. В., & Давидовський Ю.К. (2017, 12-13 жовтня). Алгоритм оптимізації топології графу в проектах модернізації інфокомунікаційної мережі. *VIII Міжнародна науково-практична конф. фахівців, магістрантів, аспірантів та науковців. «Управління проектами: проектний підхід в сучасному менеджменті»*, Одеса, 208 – 211.

2. Косенко, В. В. & Давидовський, Ю. К. (2017, 1-3 листопада). Математична модель закріплення прикладних завдань розподіленої системи по вузлах мережі. *Матеріали III міжнародної НТК. "Комп'ютерне моделювання та оптимізація складних систем"*. КМОСС-2017, Дніпро, 68-71.

3. Рева, О.А., Смідович, Л.С., & Давидовський Ю.К. (2018, 3-8 вересня). Дворівнева маршрутизація в SIP мережах. *XXVIII Міжнародна конференція «Нові технології у машинобудуванні»*, Коблево – Харків, 63.

4. Давидовський, Ю. К. (2018, 14-16 листопада). Аналіз засобів симуляції и емуляції мереж передачі даних. *Всеукраїнська VI міжнародна*

науково-технічна конференція «Проблеми інформатизації», Черкаси – Баку – Бельсько-Бяла – Полтава, 31.

5. Смідович, Л. С., Рева, О. А., & Давидовський Ю. К. (2019, 3-8 вересня) Система дистанційного навчання з курсу системний аналіз. XXIX Міжнародна конференція «Нові технології у машинобудуванні», Коблево – Харків, 115.

6. Малєєва, О. В., Давидовський, Ю. К., & Малєєва, Ю. А. (2022, 13-16 вересня). Аналіз ефективності рішень з модернізації комп'ютерних мереж. Міжнародна науково-практична конференція «Інтелектуальні інформаційні системи в управлінні проєктами та економіці в умовах воєнного стану», Коблево, 78-80.

Свідоцтва про реєстрацію авторського права:

1. Рева, О. А., Давидовський Ю. К., Казимов Р. Р., Смідович Л. С., & Соколов А. В. (2019). *Комп'ютерна програма “Програма FossProtectControl для управління з'єднаннями захищених каналів”*. Свід. про реєстр. автор. права на твір № 89926. Зареєстр. в Міністерстві економічного розвитку і торгівлі України 19.06.2019.

2. Рева, О. А., Давидовський Ю. К., Казимов Р. Р., & Соколов А. В. *Комп'ютерна програма “Програма FossProtectAgent для робочого місця с захищеним каналом з'єднання*. Свід. про реєстр. автор. права на твір № 89927. – Зареєстр. в Міністерстві економічного розвитку і торгівлі України 19.06.2019.

## ABSTRACT

*Davydovskyi Y.K.* **Models and methods of decision making to form composition of telecommunication services considering network structure.** – Qualifying scientific work on the rights of the manuscript

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in specialty 122 "Computer Science". – National aerospace university "Kharkiv Aviation Institute", Kharkiv, 2023.

Increasing competition on telecommunication services industry in Ukraine creates task for network providers to maintain and improve position on the market. It requires analysis of competitiveness of telecommunication services which are provisioned to the end users, to make decisions regarding increase of the amount of such services and improvement of their quality in regards of new communication technologies and modernization of network equipment.

Nowadays there are significant changes in human daily activities, mainly related to increased usage of Internet, or usage of distributed local, corporate networks. Voice over IP popularity causes transition to such services as videoconferences. The most recent communication services, which are offered by network providers, relates to Internet and high-quality audio and video transfer. The need for decision making regarding the introduction of the new telecommunication services is caused by the main goal of profitability for network providers in conditions of increasing number of end-users. On the other hand, there is a problem of preliminary estimation of network capabilities before the introduction of the new services.

Network traffic analysis demonstrates its tenfold growth dynamic during the last decade, and the trend is growing from year to year. Multiple new internet services were introduced, all of which require huge amount of network resources. Popularity of web services is mainly caused by their cross platform, and the fact that they are much more lightweight from hardware perspective of personal computers or smartphones.

Despite the already existing huge market of IT services within the telecommunication branch, there are still large amount of non-solved conceptual problems. One of the most important ones is the task of resource optimization for network providers during the building of the new or modernization of the existing networks topology. Any network modernization is a complex and expensive process, that is why the task of modernization costs minimization is a crucial for every business that is strives to optimize its spendings. In today's realities the above-mentioned task is being solved based only on the professionals' experience and without formalized methods, algorithms or IT tools.

Thus, development of methods and models of analysis and network structure modernization to deliver the required quality of telecommunication services is an actual scientific and applied task.

*The object of research* are processes of analysis and modernization of computer network structure.

*The subject of the research* are models, methods and information technology of network modelling for decision making on composition of telecommunication services.

*The purpose of the research* is increasing of justification for decisions making on composition of telecommunication services based on the results of imitational modelling of computer network structure to evaluate its main parameters.

To accomplish the above goal were set and completed next tasks:

1. Analyze problems of providing telecommunication services and amounts of ingress traffic growth trends in computer networks.
2. Develop the method of decision making on composition of telecommunication services considering ingress traffic and network structure.
3. Develop the method of modelling and evaluation of network parameters.
4. Develop the model of identification of overloads within the network.
5. Implement applied information technology of imitational modelling of computer network.

6. Introduce the results of the research into practical use of providing telecommunication services and network structure modernization.

*Scientific novelty* of this research is:

1. For the first time the method of network parameters evaluation has been developed, which is, unlike others, is based on the network structure modelling considering fractal properties of traffic, that will allow to justify decision making regarding introduction of the new telecommunication services.

2. The decision-making method for managing the telecommunication services provisioning has been improved, with use of ingress traffic forecasting and network structure modelling.

3. The model of network overload evaluation using emulated sliding window mechanism has been further developed, which allows to indicate overloads during the imitational modelling.

4. The applied information technology of computer network modelling has been further developed via creation of imitational model, which allows to investigate network structure which in turn allows to evaluate its main parameters to justify decisions regarding new services introduction.

In the first chapter the state of the internet telecommunication industry as of today was reviewed, as well as problems which arise due to unceasing development of new services and increasing number of end users. Outside factors that impacts on network functionality were analyzed. Reports from Ericsson and Cisco demonstrate today's and forecasted amount of network load from different perspectives, including traffic categorization by different type of provisioned services.

Conceptual basis and network modernization methods were reviewed. A conclusion has been made that there is a need for effective decision-making regarding network development strategy considering maximization of its resource utilization. Network structure is a primary factor, which impacts quality data transfer to the end users, and, accordingly, quality of telecommunication service in general.

The research about the role of modelling in forecast of network parameters was conducted and the conclusion was made, that the statistical analysis of the traffic amount in different locations and for the different time periods is a crucial task.

In the second chapter the main quality parameters of telecommunication services, that reflects the ability and effectiveness of data transfer within the computer network was reviewed. The conclusion has been made, that the network structure formation, selection of transport protocols, hardware and software are based on the end-users' requirements related to the telecommunication services QoS. Thus, to provide high quality telecommunication services, high throughput, low delay, and other parameters should be guaranteed.

As a results of the research of the world-wide traffic structure for similarity and self-similarity using a number of statistical criteria, the daily periodicity of network traffic was confirmed. Also, the hypothesis about the independence of network traffic dynamic from the geographical location and the size of the computer network was confirmed. Time row periodicity with 24 hours time lag has been confirmed, using autoregression model of time row with monthly observations.

Modern telecommunication providers development strategies were researched, considering growth and heterogeneity of network traffic. The model of synergetic network effect in conditions of multiple network merging was developed.

As a result, the method of decision making for managing the processes of telecommunication services providing based on the amount of traffic forecast and network structure modelling was introduced.

In the third chapter the method of network parameters evaluation was introduced, based on imitational modelling, network optimization and structural rebuild. The above method consists of several algorithms, which allow to transform the existing network structure into a quasi-homogenous structure, that in turn, will increase its effectiveness due to reducing spendings on excess network channels and will optimize the usage of existing resources. Observation of the imitational modelling of the lower levels of the OSI model allows to answer the following questions: will the net-

work structure be stable, will the whole specter of hardware be used with maximum utilization, will current network configuration be profitable.

Model of the transport level of the computer network was added. It was implemented as a sliding window mechanism to redistribute traffic, that cannot be transferred during certain model iteration because of low throughput, too high traffic amount, etc.

Introduced method, and its further implementation as an information technology of imitational modelling will allow significantly decrease costs and simplify the process of computer network modernization.

In the fourth chapter the architecture of the applied information technology for network behavior modelling was formalized, based on the microservices, considering future possibilities for horizontal scaling of analytical abilities of the system.

Adequacy of the developed method and models was proved using practical calculations of the test bench. Procedure of network modernizations using the information technology for network behavior modelling was reviewed. An opportunity for the minimum impact changes on the network structure to maximize QoS improvements, to save time and spendings during network modernization was reviewed. A model improvement was suggested to add a separate module, that will propose possible changes, where the number of changes and the number of delayed transfer iterations will tend zero.

Thus, complex of the method and models introduced in the research has been implemented as the software application and adequacy of the obtained modelling results has been proved. The applied information technology of computer network modelling, using imitational modelling and network structure observations was developed, which allows to evaluate primary network parameters to justify decision regarding new telecommunication services introduction.

As a result of the research the method and models have been developed, that allow to extend methodic apparatus of decision making for service management for telecommunication providers. Practical value of the developed informational technology is an ability to forecast “bottlenecks” during network modernization, or vice versa –

indicate excessiveness of certain solutions, in order to prospectively save significant costs of providers and operators of telecommunication services.

Results of the research were implemented in the National aerospace university "Kharkiv Aviation Institute", and in the telecommunication company TOB «НПК «ХОУМ-НЕТ» (Kyiv). Introduced method, the models and the information technology have practical value and can be fully implemented by telecommunication providers and internet providers at the regional level as well as at the local level.

Keywords: imitational model, information technology, computer network, strategic decision making, forecasted evaluation, traffic, network behavior, routing, optimization.

#### LIST OF THE APPLICANT'S PUBLICATIONS

Publications of the applicant on the topic of the dissertation, in which the main scientific results are published:

1. Davydovskiy, Yu. K., Malyeyeva, O. V., Kosenko, V. V. & Persiianova O. Yu. (2018). Modeliuvannia protsesiv pererozpodilu trafika v merezhakh peredachi danykh. *Matematychni modeli ta novitni tekhnolohii upravlinnia ekonomichnymy ta tekhnichnymy systemamy: monohrafiia*. Za zah. red. V. O. Timofieieva, I. V. Chumachenko, Kharkiv: FOP Panov A. M., 261 - 270. ISBN 978-617-7541-98-0
2. Reva, A. A., & Davydovskiy, Y. K. (2018). Method of the network topology transformation to quasihomogeneous structure. *Radioelectronic and Computer Systems*, 0(2), 43-51. <https://doi.org/10.32620/reks.2018.2.05>
3. Davydovskiy, Yu., Reva, A., & Malyeyeva, O. (2018). Method of modelling the parameters of data communication network for its upgrading. *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, (4(6), 15-22. <http://dx.doi.org/10.30837/2522-9818.2018.6.015>
4. Davydovskiy, Yu., Reva, O., Artiukh, R., & Kosenko, V. (2019). Simulation of computer network load parameters over a given period of



time. *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, (3 (9), 72–80. <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2019.9.072>

5. Davydovskiy, Y., Reva, O., Malyeyeva, O., & Kosenko, V. (2020). Application of the sliding window mechanism in simulation of computer network loading parameters. *Advanced Information Systems*, 4(1), 16–22. <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2020.1.03>

6. Malyeyeva, O., Kosenko, V., Davydovskiy, Y., & Boiev, D. (2020). Factor synergy analysis and merger strategy models in investigation of telecommunication operators' performance. *Advanced Information Systems*, 4(2), 130–136. <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2020.2.19>

7. Smidovych, L., & Davydovskiy, Y. (2022). Processes of the telecom operator's information architecture transformation. *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, (1 (19), 47–54. <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2022.19.047>.

8. Malyeyeva, O., Davydovskiy, Y., & Kosenko V. (2019). Statistical analysis of data on the traffic intensity of Internet networks for the different periods of time. *Second International Workshop on Computer Modeling and Intelligent Systems (CMIS-2019)*, 897-910. ISSN 1613-0073. <https://ceur-ws.org/Vol-2353/paper71.pdf>

Publications of the applicant on the topic of the dissertation, which certify the approbation of the dissertation materials:

1. Malyeyeva, O. V., & Davydovskiy, Yu. K., (2017, 12-13 October). Alhorytm optymizatsii topolohii hrafu v proektakh modernizatsii infokomunikatsiinoi merezhi. *VIII Mizhnarodna naukovo-praktychna konf. fakhivtsiv, mahistrantiv, aspirantiv ta naukovtsiv. «Upravlinnia proektamy: proektnyi pidkhid v suchasnomu menedzhmenti»*, Odesa, 208 – 211.

2. Kosenko, V. V., & ДАВИДОВСЬКИЙ, Ю. К. (2017, 1-3 November). Matematychna model zakriplennia prykladnykh zavdan rozpodilenoï systemy po

ovuzlakh merezhi. *Materialy III mizhnarodnoi NTK. "Kompiuterne modeliuвання ta optymizatsiia skladnykh system"*. KMOSS-2017, Dnipro, 68-71.

3. Reva, O. A., Smidovych, L. S., & Davydovskyi, Yu. K. (2018, 3-8 September). Dvorivneva marshrutyzatsiia v SIP merezhakh. *XXVIII Mizhnarodna konferentsiia «Novi tekhnologii u mashynobuduvanni»*, Koblevo – Kharkiv, 63.

4. Davydovskyi, Yu. K. (2018, 14-16 November). Analiz zasobiv symuliatcii y emuliatcii merezh peredachi danykh. *Vseukrainska VI mizhnarodna naukovo-tekhnichna konferentsiia «Problemy informatyzatsii»*, Cherkasy – Baku – Belsko-Biala – Poltava, 31.

5. Smidovych, L. S., Reva, O. A., & Davydovskyi, Yu. K. (2019, 3-8 September). Systema dystantsiinoho navchannia z kursu systemnyi analiz. *XXIX Mizhnarodna konferentsiia «Novi tekhnologii u mashynobuduvanni»*, Koblevo – Kharkiv, 115.

6. Malyeyeva, O. V., Davydovskyi, Yu. K., & Malieieva, Yu. A. (2022, 13-16 September). Analiz efektyvnosti rishen z modernizatsii kompiuternykh merezh. *Mizhnarodna naukovo-praktychna konferentsiia «Intelektualni informatsiini systemy v upravlinni proiektamy ta ekonomitsi v umovakh voiennoho stanu»*, Koblevo, 78-80.

#### Certificates of copyright registration:

1. Reva, O. A., Davydovskyi, Yu. K. Kazymov R. R., Smidovych L. S., & Sokolov A. V. (2019). Computer program "Prohrama FossProtectControl dlia upravlinnia ziednanniamy zakhyschenykh kanaliv". Certificate of copyright registration for the work No. 89926. – Registered in the Ministry of Economic Development and Trade of Ukraine 19.06.2019.

2. Reva, O. A., Davydovskyi, Yu. K. Kazymov R. R., & Sokolov A. V. Computer program "Prohrama FossProtectAgent dlia robochoho mistsia s zakhyschenym kanalom ziednannia". Certificate of copyright registration for the work No. 89927. – Registered in the Ministry of Economic Development and Trade of Ukraine 19.06.2019.

## ЗМІСТ

ВСТУП	4
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ ТА ІСНУЮЧИХ МЕТОДІВ ДОСЛІДЖЕННЯ КОМП'ЮТЕРНИХ МЕРЕЖ	10
1.1 Передумови актуалізації проблем надання телекомунікаційних послуг	10
1.2 Аналіз чинників впливу динамічного середовища на функціонування комп'ютерних мереж	14
1.3 Огляд сучасного стану та напрямків розвитку телекомунікаційних послуг	19
1.4 Методи аналізу та управління параметрами комп'ютерних мереж	21
1.5 Роль моделювання в прогнозуванні характеристик комп'ютерних мереж	25
1.6 Висновки до розділу. Постановка завдання	30
РОЗДІЛ 2. МЕТОД ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ З ФОРМУВАННЯ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ ПОСЛУГ ТА АНАЛІЗ СТРУКТУРИ ВХІДНОГО ТРАФІКУ	32
2.1 Метод прийняття рішень з формування складу телекомунікаційних послуг	32
2.2 Формалізація показників якості комп'ютерної мережі	45
2.3 Статистичний аналіз та прогнозування обсягів вхідного потоку	50
2.4 Моделі стратегії злиття в дослідженні ефективності діяльності операторів зв'язку	64
2.5 Висновки до розділу	70
РОЗДІЛ 3. МОДЕЛЮВАННЯ ТОПОЛОГІЇ ТА ПОВЕДІНКИ КОМП'ЮТЕРНИХ МЕРЕЖ У ДИНАМІЧНОМУ СЕРЕДОВИЩІ	72
3.1 Формування потенційно ймовірних структур комп'ютерних мереж	72
3.2 Метод модернізації топології комп'ютерної мережі у квазіоднорідну	75

структуру

3.3	Характеристики комп'ютерної мережі на нижніх рівнях моделі OSI	80
3.4	Метод оцінювання параметрів комп'ютерної мережі на основі моделювання її структури	84
3.5	Модель оцінки навантаження в комп'ютерній мережі з емуляцією механізму ковзаючого вікна	96
3.6	Висновки до розділу	104
РОЗДІЛ 4. ПРИКЛАДНА ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ ІМІТАЦІЙНОГО МОДЕЛЮВАННЯ КОМП'ЮТЕРНИХ МЕРЕЖ		106
4.1	Структура прикладної інформаційної технології імітаційного моделювання	106
4.2	Програмна реалізація методу моделювання топології комп'ютерної мережі	113
4.3	Приклад моделювання поведінки комп'ютерної мережі за допомогою інформаційної технології	115
4.4	Оптимізація структури мережі на основі отриманих результатів моделювання	120
4.5	Висновки до розділу	124
ВИСНОВКИ		126
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ		128
ДОДАТОК А. Документи впровадження основних результатів дисертаційної роботи		144
ДОДАТОК Б. Список публікацій здобувача		148

## ВСТУП

**Обґрунтування вибору теми дослідження.** Загострення конкуренції на ринку телекомунікаційних послуг в Україні обумовлює для операторів зв'язку задачі утримання та укріплення позицій на цьому ринку. Для цього необхідно проводити аналіз конкурентоспроможності телекомунікаційних послуг, що надаються споживачам, приймати рішення щодо їх розширення або поліпшення якості відповідно до нових технологій зв'язку та технічного розвитку мережевого обладнання.

Сьогодні новітні комунікаційні сервіси, які пропонують оператори телекомунікацій, стосуються саме Інтернету, можливостей передачі звуку й відео високої якості. Телекомунікаційні послуги розвиваються в усіх країнах світу. Необхідність прийняття рішень щодо впровадження нових телекомунікаційних послуг обумовлена прагненням отримати суттєвий прибуток для операторів зв'язку за умови збільшення кількості абонентів. З іншої сторони, існує проблема попередньої оцінки можливості та результатів впровадження нових послуг.

Наразі спостерігаються масштабні зміни у щоденній людській діяльності, насамперед мається на увазі зростання людської активності у мережі Internet, або використання локальних, корпоративних мереж. Популярність інтернет телефонії зумовила перехід до впровадження таких сервісів як відеоконференції.

Зростання обсягів трафіку комп'ютерних мереж показує його десятикратну динаміку за останнє десятиліття, при цьому тренд до зростання збільшується з року в рік. Було запропоновано значну кількість нових інтернет-сервісів, які потребують великої кількості мережевих ресурсів. Популярність веб-сервісів в першу чергу зумовлена їх кросплатформенністю і тим, що вони набагато «легші» з точки зору апаратних складових комп'ютерів, або смартфонів.

Та незважаючи на вже існуючий величезний ринок ІТ послуг у сфері телекомунікацій, ще досі існує багато невирішених концептуальних проблем. Однією з найважливіших серед них є оптимізація ресурсів компаній-провайдерів при побудові нових, або зміні існуючих топологій мереж. Будь яка модернізація мережі є складним та коштовним процесом, тому вирішення завдання зменшення вартості модернізації мережі є життєво необхідним для будь якого бізнесу, який бажає оптимізувати свої витрати. В умовах сьогодення вказана проблема вирішується, опираючись тільки на досвід спеціалістів та без допомоги формалізованих методів, алгоритмів та інформаційних технологій.

Таким чином, розробка методів та моделей аналізу і модернізації структури комп'ютерної мережі для забезпечення якості сучасних телекомунікаційних послуг, є **актуальною науково-прикладною задачею**.

**Мета і завдання дослідження.** Метою дисертаційного дослідження є підвищення обґрунтованості прийняття рішень з формування складу телекомунікаційних послуг на основі результатів імітаційного моделювання структури комп'ютерної мережі для оцінки її основних параметрів.

Для досягнення зазначеної мети треба вирішити такі завдання:

7. Проаналізувати проблеми надання телекомунікаційних послуг та тенденції зростання вхідного трафіку в комп'ютерних мережах.

8. Розробити метод прийняття рішень з формування складу телекомунікаційних послуг з урахуванням вхідного трафіку та структури комп'ютерної мережі.

9. Розробити метод моделювання та оцінки параметрів комп'ютерної мережі.

10. Розробити розрахункову модель для виявлення перевантажень в мережі.

11. Розробити прикладну інформаційну технологію імітаційного моделювання комп'ютерної мережі.

12. Впровадити результати дисертаційного дослідження в практику надання телекомунікаційних послуг та модернізації комп'ютерних мереж.

*Об'єкт дослідження* - процеси аналізу та модернізації структури комп'ютерних мереж.

*Предмет дослідження* - моделі, методи та інформаційна технологія моделювання комп'ютерних мереж для прийняття рішень з формування складу телекомунікаційних послуг.

**Методи дослідження.** Теоретичну основу дослідження складають наукові праці зарубіжних та вітчизняних вчених в галузі аналізу та проектування комп'ютерних мереж. Для моделювання параметрів навантаження комп'ютерної мережі застосовуються методи системного аналізу, моделі функціонування мережі, метод імітаційного моделювання. Для формування та аналізу структури комп'ютерних мереж застосовано теорію графів, алгоритми оптимізації, алгоритмічне моделювання. При розробці методів аналізу функціонування мережі застосовано методи теорії ймовірностей та статистичного і системного аналізу. При формуванні бізнес-моделей діяльності операторів зв'язку використовуються причинно-наслідкові та векторно-матричні моделі.

#### **Наукова новизна отриманих результатів:**

5. Вперше розроблено метод оцінювання параметрів комп'ютерної мережі, який на відміну від існуючих, оснований на моделюванні її структури транспортного рівня з урахуванням фрактальних властивостей трафіку, що дозволить обґрунтувати прийняття рішення щодо впровадження нових послуг.

6. Удосконалено метод прийняття рішень з управління процесами надання телекомунікаційних послуг, шляхом прогнозування обсягу вхідного потоку та моделювання структури комп'ютерної мережі.

7. Набула подальшого розвитку модель оцінки навантаження в комп'ютерній мережі шляхом емуляції механізму ковзаючого вікна, що дозволяє виявити перевантаження в процесі імітаційного моделювання мережі.

8. Набула подальшого розвитку прикладна інформаційна технологія моделювання комп'ютерної мережі шляхом створення імітаційної моделі для

дослідження її структури, що надає змогу оцінювати основні показники мережі, які є підставою для обґрунтування рішень щодо впровадження нових послуг.

**Особистий внесок здобувача.** Усі основні наукові положення за темою дослідження, результати та висновки, які винесені на захист, отримані автором самостійно. Здобувачеві у спільних роботах особисто належать такі результати: математична модель задачі управління розподілом трафіку [1], методика модернізації топології комп'ютерної мережі [2], метод оцінювання та моделювання параметрів мережі передачі даних [3], модель поведінки комп'ютерної мережі на протязі певного проміжку часу та інформаційна технологія імітаційного моделювання поведінки комп'ютерної мережі [4], механізм моделювання функцій ковзаючого вікна [5], аналіз стратегій та метод прийняття рішень з розвитку операторів зв'язку [6], аналіз вимог, що висуваються до інформаційних систем підтримки бізнесу та операційної діяльності [7], статистичний аналіз періодичності трафіку та прогнозування його обсягу на основі авторегресійної моделі [8], алгоритм оптимізації топології графу [9], обмеження оптимізаційної задачі розподілу, обумовлені вимогами до структури мережі [10], дослідження змішаної маршрутизації з використанням каналів з абонентською оплатою за користування каналом [11], опис застосування теорії графів для оптимізації структур розподілених систем [13], система показників для прийняття рішення з модернізації комп'ютерної мережі [14], алгоритм комп'ютерної програми [15], технології захисту каналу з'єднання [16]. Публікація [12] написана особисто.

**Апробація матеріалів дисертації.** Основні результати дисертаційної роботи, висновки та пропозиції доповідалися і обговорювалися на науково-технічних семінарах кафедри комп'ютерних наук та інформаційних технологій і на таких конференціях: Міжнародна науково-практична конференція фахівців, магістрантів, аспірантів та науковців «Управління проектами: проектний підхід в сучасному менеджменті» (Одеса, 2017р.); III міжнародна науково-технічна конференція «Комп'ютерне моделювання та оптимізація складних систем». КМОСС-2017 (Дніпро, 2017); Всеукраїнська VI міжнародна науково-



технічна конференція «Проблеми інформатизації» (Черкаси – Баку – Бельсько-Бяла – Полтава, 2018р.); XXVIII та XXIX Міжнародні конференції «Нові технології у машинобудуванні» (Коблево – Харків, 2018р. та 2019р.); Міжнародна науково-практична конференція «Second International Workshop on Computer Modeling and Intelligent Systems (CMIS-2019)» (Запоріжжя, 2019р.); Міжнародна науково-практична конференція «Інтелектуальні інформаційні системи в управлінні проєктами та економіці в умовах воєнного стану» (Коблево, 2022р.).

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота виконана на кафедрі комп'ютерних наук та інформаційних технологій Національного аерокосмічного університету ім. М.Є. Жуковського «ХАІ» в рамках науково-дослідних робіт «Інформаційні технології в управлінні розвитком організаційно-технічних систем» (№ Д/Р 0118U003824, 2018 – 2020 рр.) та «Інформаційні технології в управлінні логістичними та розподіленими системами» (№ ДР 0121U111437, 2021 – 2023 рр.). Внесок здобувача полягає в створенні моделі оцінки динаміки поведінки мережі передачі даних у задачах управління та розробки інформаційної технології імітаційного моделювання комп'ютерної мережі.

**Практичне значення отриманих результатів** полягає у тому, що розроблені методи та інформаційна технологія дозволяють прогнозувати моменти перевантаження мережі відповідно запитів щодо підвищення ефективності використання комп'ютерної мережі для певного складу телекомунікаційних послуг, визначити «вузькі місця» під час модернізації топології комп'ютерної мережі, або навпаки - вказати на надмірність певних рішень, щоб у перспективі зекономити значні кошти операторів зв'язку. Крім того моделювання параметрів мережі надає змогу прийняти раціональне рішення стосовно вибору варіанта надання телекомунікаційних послуг з урахуванням витрат на зміну структури мережі.

Розроблені автором наукові положення впроваджені в:

- 1) навчальному процесі кафедри комп'ютерних наук та інформаційних технологій Національного аерокосмічного університету ім. М.Є. Жуковського «ХАІ»;
- 2) у ТОВ «НПК «ХОУМ-НЕТ» (м.Київ).

**Структура та обсяг роботи.** Дисертація містить анотацію, зміст, вступ, чотири розділи, висновки, список використаних джерел та додатки. Повний обсяг дисертації становить 167 сторінок друкованого тексту, з них анотації (українською та англійською) – на 20 сторінках, зміст – на 2 сторінках, основний текст – на 124 сторінках у тому числі 60 рисунків (з них 4 на окремих сторінках) та 14 таблиць (з них 2 на окремих сторінках), 2 додатки на 7 сторінках. Список використаних джерел містить 128 найменувань на 16 сторінках.

## РОЗДІЛ 1

### АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ ТА МЕТОДІВ ДОСЛІДЖЕННЯ КОМП'ЮТЕРНИХ МЕРЕЖ

#### **1.1 Передумови актуалізації проблем надання телекомунікаційних послуг**

Відповідно до правил Європейського Союзу телекомунікацій, загальнодоступні послуги, що надаються операторами зв'язку? є необхідною умовою для соціальної інтеграції. В сучасних умовах воєнного стану склад та якість телекомунікаційних послуг потребує особливої уваги. Набір основних послуг, які доступні та є необхідними для участі в житті суспільства мають назву «універсальна послуга». У практиці Європейського Союзу універсальна послуга визначається як мінімальний набір послуг зв'язку, які є доступними для всіх споживачів країни, незалежно від географічного розташування. Але задачі впровадження нових телекомунікаційних послуг залишаються актуальними як для теоретичних досліджень, так і для практичних рішень, тому що у сучасних умовах української економіки є необхідними, однак мало дослідженими [17 - 19]. Вказані завдання є особливо важливими в умовах погіршення економічного стану населення країни і водночас збільшення попиту на комунікаційні та інформаційні ресурси під час військової агресії.

Наведемо деякі поняття. *Оператором мережі* (Network Operator) називається компанія, яка є власником телекомунікаційної інфраструктури та бере на себе всі витрати щодо забезпечення її працездатності з заданим рівнем якості обслуговування. Цю компанію ще називають оператором зв'язку. *Послуга* – це надана комп'ютерною мережею можливість задовольнити телекомунікаційні та/або інформаційні потреби користувача. *Телекомунікаційні послуги* (Telecommunication Services ) є кінцевим продуктом діяльності

оператора зв'язку, вони надаються шляхом транспортування інформації комп'ютерною мережею [20].

Традиційними послугами є:

- передавання мовлення через Інтернет VoIP (Voice over IP),
- потокове відео (Streaming Video),
- інтерактивні ігри (Interactive Games),
- Інтернет-радіо (Internet Radio) та ін.

Існують комбіновані послуги: IPTV, VoD (Video on Demand), GoD (Game on Demand), AoD (Application on Demand), MoD (Music on Demand), IVR (Interactive Voice Response), VM (Voice Mail), VoIP, Unified Messaging тощо. Такі послуги називають Triple Play або 3Play («три в одному») [21].

Телекомунікаційні послуги призначено для задоволення потреб у інформаційних ресурсах абонентів мережі, а також локальних мереж, які можна об'єднати одним поняттям «користувачі мережі» (users). Комп'ютерна мережа не вносить змін у зміст інформації, що передається. Тому телекомунікаційні послуги іноді називають послугами транспорту. Надання саме транспортних ресурсів здійснюють оператори зв'язку.

Перспективною сферою є корпоративний ринок. Надання послуг FMC для бізнес-клієнтів сприяє підвищенню рівня доходів операторів мобільного зв'язку та розширення абонентської бази.

Напрямок конвергенції застосунків визначає їх постачання через різні середовища передавання у форматі, що враховує різницю швидкостей доступу цих середовищ. Конвергенція застосунків відноситься до типу послуг кінцевих продуктів, це надання споживачам послуг голосу, даних і відео через усі доступні типи мереж інноваційними методами. Конвергенція може бути реалізована і на рівні пристроїв. Конвергенція послуг та застосунків передбачає використання інтелектуальних термінальних пристроїв, а також спеціальної платформи надання послуг.

Наразі суттєво зросли вимоги до якості передавання трафіку для надання зазначених послуг.

У період ринкових відносин основні інтереси операторів зв'язку зосереджуються на пошуку нових комплексних рішень щодо розширення послуг, які надаються користувачам [22, 23]. Операторам мобільного зв'язку фіксована мережа дозволяє надавати повний набір телекомунікаційних послуг.

Розвиток телекомунікацій реалізував тенденції до:

- мультисервісності, яка означає незалежність технологій надання послуг від транспортних технологій;
- широкосмуговості, яка зумовила зміни швидкості передавання інформації відповідно до потреб користувача;
- мультимедійності, для передавання багатокomпонентної інформації (мовлення, дані, відео, аудіо та ін.) з її синхронізації у реальному часі;
- інтелектуальності, для керування послугою, викликом і з'єднанням користувачів або постачальників послуг;
- інваріантності доступу, тобто доступ до послуг незалежно від застосованих технологій;
- багатооператорності, коли декілька операторів діють спільно але розмежовують сфери відповідальності.

До того ж додаються процеси конвергенції мереж:

- зміна мережевих архітектур, відмова від ієрархії мереж;
- чіткий поділ рівнів транспортування інформації та рівня формування послуг;
- перехід до інфокомунікацій;
- участь у інформаційному процесі різних учасників: користувачів, мережевих операторів і контент-провайдерів.

Однак існує невизначеність у співвідношенні часток трафіку різних типів, що транспортуються в мережі, та критеріїв оцінювання якості функціонування мережі. Крім того, змінюється значимість цих критеріїв в процесі розвитку телекомунікацій.

В роботах, що присвячені проблемі забезпечення конкурентоспроможності телекомунікаційних послуг [24], основними

критеріями їх конкурентоспроможності розглядались якість та ціна послуг, а цей підхід є спрощеним. На сьогодні треба розглядати такі критерії оцінювання телекомунікаційних послуг: якість послуги як техніко-технологічний аспект; споживча ціна послуги; споживча новизна послуги; якість обслуговування; наявність додаткових послуг; імідж [25].

Питання конкурентоспроможності у галузі телекомунікацій розглядалися також у працях А. В. Дзюбинського [26], І. А. Кораблінової [27] та Т. В. Гільорме [28].

Так, І. А. Кораблінова [27] запропонувала поєднати ресурсний та процесний підходи в аналізі діяльності операторів телекомунікацій, що надасть можливість удосконалювати бізнес-процеси, що забезпечують конкурентоспроможність послуг.

Сьогодні можна охарактеризувати стрімким зростанням обсягів трафіку комп'ютерних мереж. Ця тенденція зумовлена швидким розвитком таких комп'ютерних технологій як: хмарні обчислення, хмарні сховища даних, «стрімінгові» сервіси для фільмів, музики або ігор. Однак, таке зростання не є новиною для інтернет провайдерів, згідно з наявною статистикою, яка свідчить про те, що обсяги трафіку за останні 10 років зросли у 8-10 разів [29], а кількість користувачів, підключених до мережі інтернет у відстковому співвідношенні зросла з 23% до 55% [30]. Все це зумовлює необхідність прийняття рішень операторами зв'язку щодо збільшення та модернізації існуючих комп'ютерних мереж.

Першочерговою задачею при формуванні складу телекомунікаційних послуг є аналіз трафіку комп'ютерної мережі, а саме - його структури та обсягу [31 - 33]. При цьому треба виявляти та описувати закономірності динаміки трафіку на протязі певного часу.

Зміни обсягів трафіку комп'ютерних мереж показує значну динаміку зростання [34, 35]. Забезпечення якості зв'язку також є проблемою, що потребує вирішення. Так, мобільні користувачі втрачають TCP-з'єднання, коли вони переміщуються або змінюються їх IP-адреси, або деякі вузли вздовж

шляху маршрутизації не можуть забезпечити зв'язок. Крім того можливі тимчасові втрати. Такі проблеми також виникають і у кабельних мережах. Вказані ситуації мають особливо шкідливий вплив на процеси безперервного обміну даних великих обсягів або при переказі коштів банківського рахунку. Таким чином, в процесах забезпечення якісного функціонування комп'ютерних мереж важливу роль відіграє система управління потоками даних [36], яка вирішує завдання: управління перевантаженням, управління чергами, управління відновленням передачі після втрати зв'язності мережі, управління відновленням втрачених пакетів та пакетів, які надійшли з помилками.

## **1.2 Аналіз чинників впливу зовнішнього середовища на функціонування комп'ютерних мереж**

Зростання людської активності у мережі Internet можна наявно продемонструвати, опираючись на дані з різних джерел, таких як: Ericsson, Cisco та інші.

Компанія Cisco прогнозує зростання цього трафіку на третину більше ніж увесь інший трафік. Це зростання присутнє не тільки у повсякденних активностях у мережі Internet, але й у сферах бізнесу, тобто корпоративних мережах. Згідно зі статистичними прогнозами компанії Cisco у період з 2019 по 2023 роки, використання відеоконференцій зумовить потрійне зростання трафіку у корпоративних мережах [35] (рис. 1.1).

У компанії Cisco прогнозують, що в найближчі п'ять років через IP буде передано більше даних, ніж за всю попередню історію інтернету [37]. До 2026 року через глобальні мережі буде передано більшу кількість IP-трафіку, ніж за всі роки від моменту зародження інтернету і до 2016 року. Більш 28 мільярдів пристроїв і підключень будуть зареєстровані в мережі.

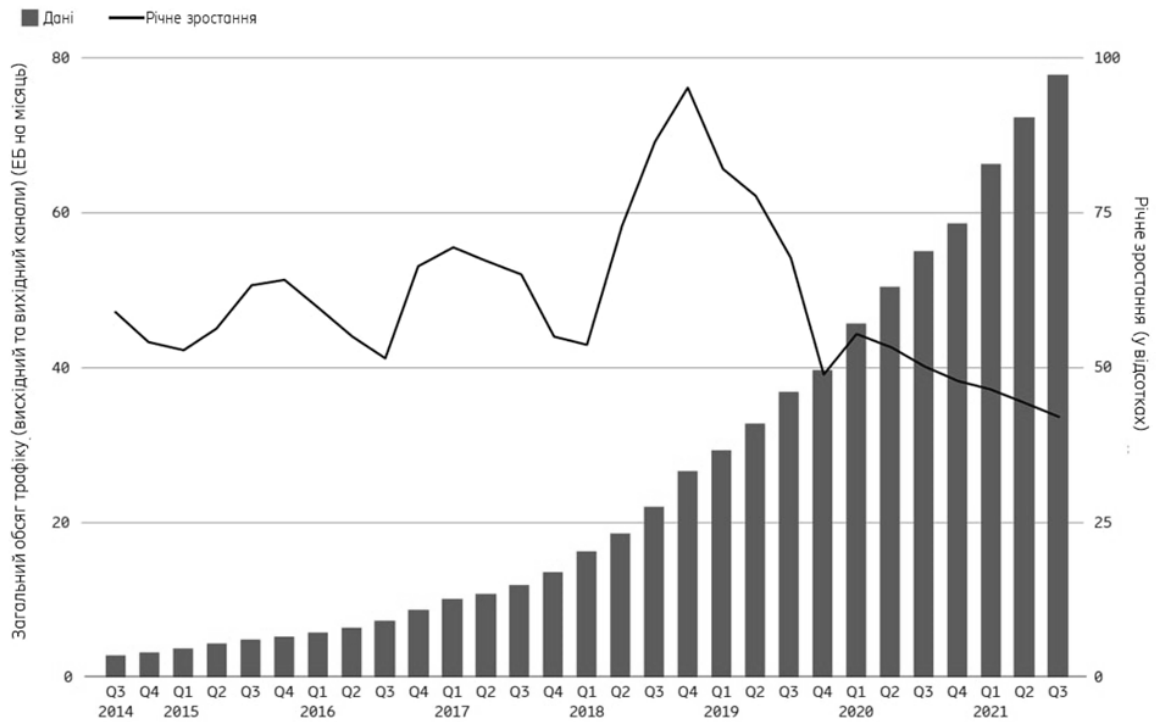


Рисунок 1.1 - Світовий трафік даних у мобільних мережах: річне зростання

Популярність інтернет телефонії зумовила перехід до впровадження таких сервісів як відеоконференції. Це відкрило нові горизонти для розвитку мережевих технологій у вигляді «стрімінгових» (потоківих) сервісів, які дозволяють передавати відеозображення без втрат якості в режимі online на комп'ютери мільйонів глядачів одночасно. В свою чергу розвиток розподілених обчислень вимагає розвитку технологій передачі даних, особливо з точки зору апаратного забезпечення, що призвело до зростання швидкостей підключення до мережі інтернет від 10 Мб в секунду на початку 2000 років до 1 Гб каналів, які можуть бути підключені вже сьогодні для домашнього користування.

Звіти компаній Ericsson та Cisco демонструють теперішнє та прогнозоване навантаження на мережі передачі даних у різних перспективах, в тому числі, із кластеризацією за типами наданих послуг та сервісів. Наприклад наступна гістограма, узята з доповіді Ericsson, демонструє, що зростання трафіку є нерівномірним та в період з 2016 по 2022 рік відбувається зростання насамперед відео-, аудіотрафіку, а також трафіку соціальних мереж (рис. 1.2) [38].



Mobile traffic by application category  
CAGR 2016-2022 (percent)

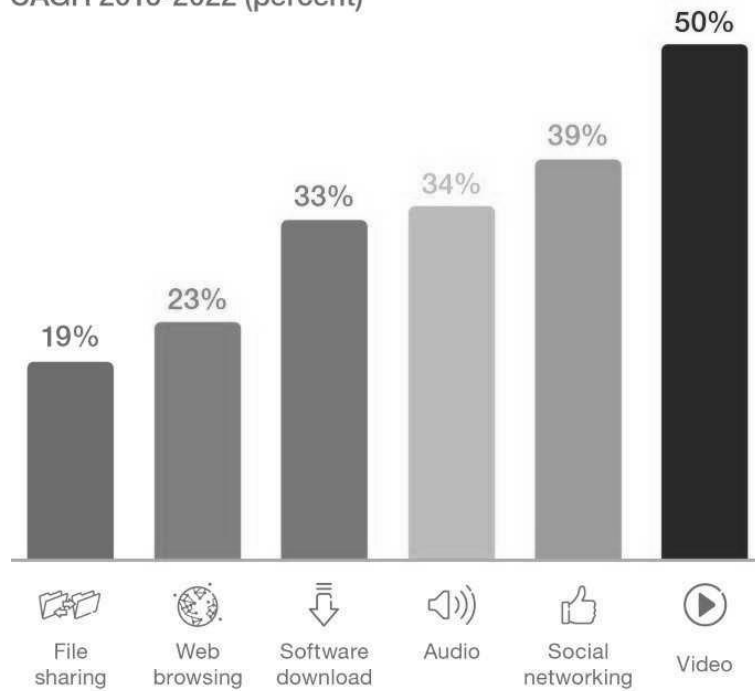
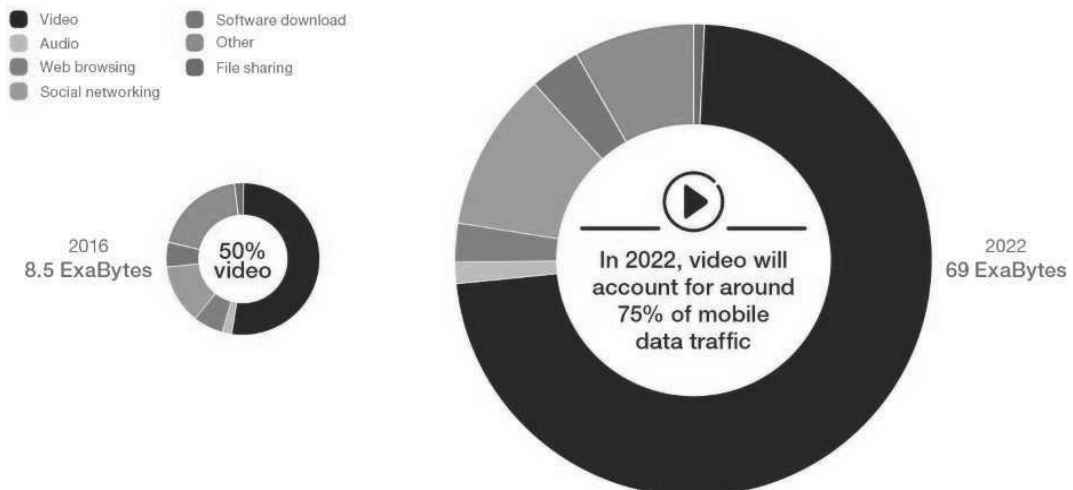


Рисунок 1.2 - Графік зростання обсягів трафіку за категоріями

Для більшої повноти розуміння цієї проблеми Ericsson наводить не тільки відносні, але й конкретні цифри зростання навантаження (рис. 1.3) [38].

Mobile traffic by application category per month (ExaBytes)



<sup>1</sup> Video is likely to form a major part of file sharing traffic in addition to the identified application type 'video'  
<sup>2</sup> Ericsson ConsumerLab, TV and Media (2016)

Рисунок 1.3 - Графік зростання обсягів трафіку

Відео-трафік в IP-мережах у 2022 році збільшився в чотири рази. Тобто на частку відео припадає до 82% всього інтернет-трафіку.

Ігровий трафік зріс у дев'ять разів в період з 2017 по 2022 рік. У 2022 році його частка досягла 4% від загальних обсягів IP трафіку.

Трафік пристроїв віртуальної і доповненої реальності продемонстрував стрімке зростання у міру того, як все більша кількість споживачів і підприємств почала використовувати цю технологію. У 2022 року частка трафіку пристроїв віртуальної і доповненої реальності досягла позначки в 4.02 екзабайт на місяць - при 0.33 екзабайт на місяць в 2017 році

Активно розвивається інтернет речей (IoT), який робить істотний внесок у трафік (рис. 1.4). Найбільший сегмент IoT - пристрої, підключені до широкопasmового інтернету [39].

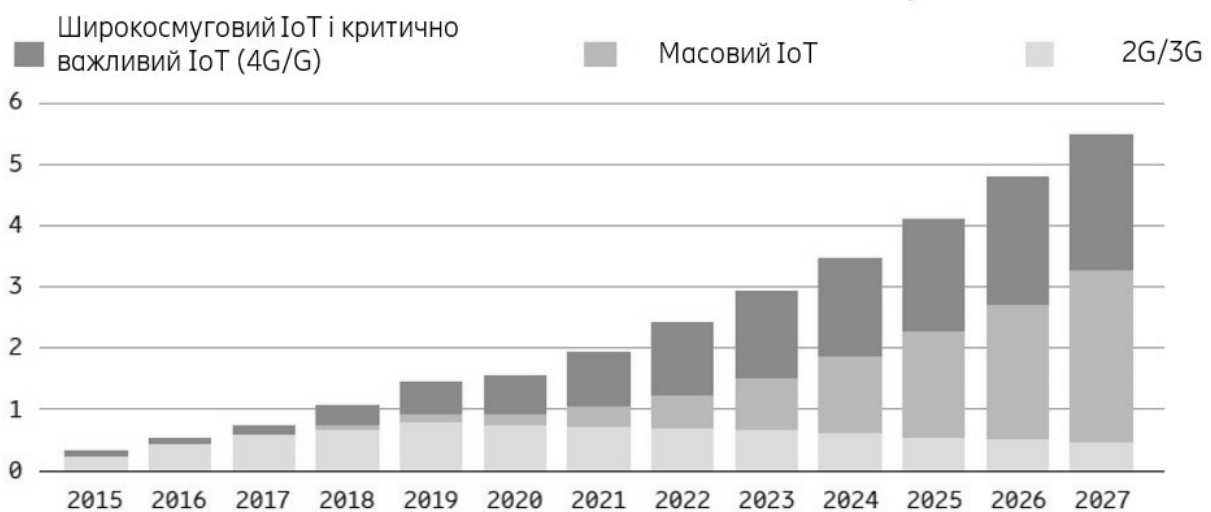


Рисунок 1.4 – Динаміка зростання та прогноз обсягу мобільних IoT-підключень за сегментами та технологіями

Можна зробити висновок, що зростання трафіку відбувається у геометричній прогресії. Однак є ще одна ключова характеристика – це кластеризація трафіку не за типом переданих даних, а за розподілом передачі

даних на добу, тобто так званий "Busy-hour Internet traffic" [40]. У 2022 році в саму завантажену годину інтернет-трафік був в шість разів інтенсивніше середніх показників.

Через це постає закономірне питання збільшення потужностей комп'ютерних мереж. Але, якщо тренд сьогодні задають такі мережеві технології як GRID обчислення або хмарні сховища даних, такі очевидні питання як фізична модернізація каналів зв'язку, побудова мереж та інше, вирішується досить дорого та у багатьох випадках надлишково. Ця ситуація призводить до збільшення вартості використання комп'ютерних мереж.

Провайдери послуг по всьому світі зосереджені на питаннях трансформації своїх мереж з метою кращого управління і маршрутизації трафіку для надання послуг преміум-класу.

Для підтримки конкурентоздатності на ринку телекомунікаційних послуг, компанії мають постійно підвищувати якість послуг. Це може бути досягнуто шляхом збільшення покриття, тобто збільшення кількості вузлів та каналів зв'язку, або шляхом оптимізації та часткової, або повної заміни існуючої топології мережі.

В той час, як мережеві конфігурації можуть бути змодельовані за допомогою таких програмних пакетів як Packet Tracer від компанії Cisco, вони не дають змоги змоделювати навантаження на мережу у залежності від кількості вхідного трафіку. Крім того, не дають аналітичних порад щодо побудови мережі. Це призводить до необхідності створення інструменту, який міг би послідовно виконувати ці функції.

### **1.3 Огляд сучасного стану та напрямків розвитку телекомунікаційних послуг**

Впровадження нових телекомунікаційних послуг (особливо послуг, пов'язаних з передачею відеотрафіку) сприятиме зростанню навантаження мереж передачі даних. Крім того, мережі функціонують як мультисервісні з використанням новітніх IP-технологій. Рівень завантаження граничних вузлів вже на сьогоднішній день складає 60-70%. Подальше збільшення навантаження за рахунок впровадження нових послуг потребує аналізу їх ефективності та дослідження прогнозованого трафіку.

Необхідно приймати ефективні рішення щодо вибору стратегій розвитку мережі для максимального використання її ресурсів. Налаштування гнучкої системи управління трафіком вимагає часу, знань та значних коштів. Слід здійснювати всебічний аналіз ресурсів мережі та трафіку, за результатами якого формувати рішення з вибору складу телекомунікаційних послуг. Основними завданнями при управлінні трафіком є мінімізація втрат пакетів і затримок, оптимізація пропускної здатності та забезпечення якості послуг.

Незважаючи на значну кількість теоретико-методичних публікацій з управління діяльністю операторів зв'язку і телекомунікацій, підприємств промисловості зв'язку, в існуючих публікаціях в основному розглянуто лише відносини з позицій постачальника (виробників обладнання) і споживача (операторів і провайдерів) [41 - 43]. Залишається недостатньо вивченим процес формування й реалізації стратегій розвитку операторів зв'язку для підтримки ефективності їх діяльності в умовах різнорідного та зростаючого трафіку [44, 45]. Крім того, розвиток економічних відносин у сфері передачі даних викликає розширення сфери взаємодії операторів зв'язку на основі кооперації й інтеграції [46, 47]. Ці процеси також є недостатньо вивченими з позицій ефективності передачі даних в об'єднаних мережах.

Сучасний розвиток телекомунікаційних послуг характеризується підвищенням обсягу трафіку (рис. 1.4), що обумовлено зростанням споживання «об'ємних» видів контенту (рис. 1.5) [48].

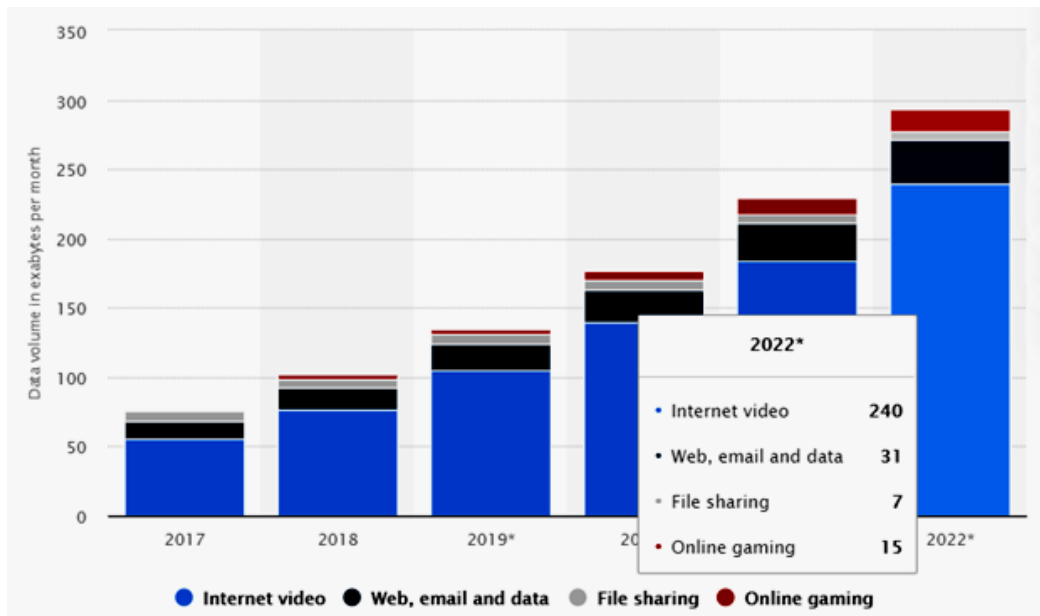


Рисунок 1.4 - Тенденція зростання трафіку споживання послуг зв'язку

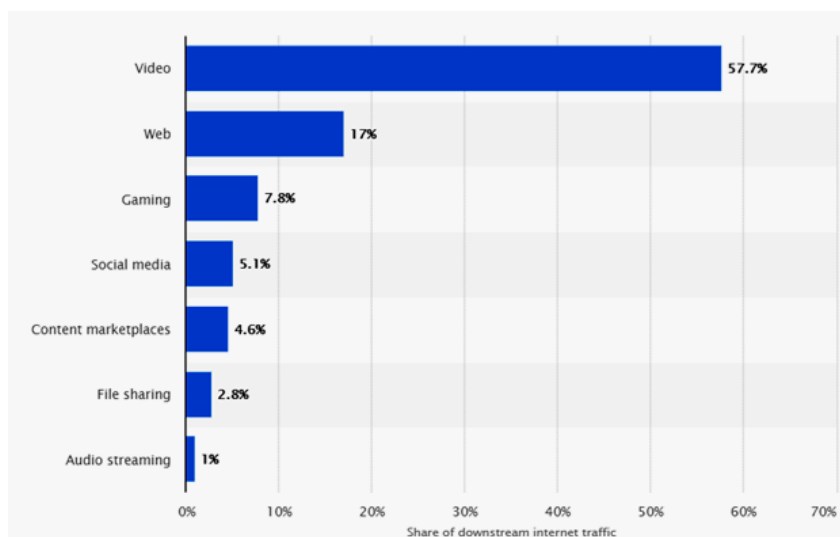


Рисунок 1.5 - Розподіл різних видів контенту при споживанні послуг зв'язку

Крім того, ринок телекомунікацій характеризується підвищеною конкуренцією його учасників [49, 50]. Це призводить до необхідності пошуку та застосування компаніями найбільш ефективних стратегій розвитку [9].

Наприклад, компанії Jio і Microsoft в рамках конкурентної боротьби та у цілях розвитку впроваджують сучасні технології, такі як аналітика даних, штучний інтелект, когнітивні сервіси, блокчейн, Інтернет речей і периферійні обчислення. AT & T Communications і корпорація Microsoft сформували довгостроковий альянс, в рамках якого будуть застосовувати інноваційні технології, такі як хмарні обчислення, штучний інтелект і 5G. SK Telecom і Microsoft є операторами-партнерами і планують протестувати можливості потокової передачі ігор.

#### **1.4 Методи аналізу та управління параметрами комп'ютерних мереж**

При формуванні складу телекомунікаційних послуг та з метою забезпечення їх якості, до комп'ютерних мереж пред'являються дуже високі вимоги як по продуктивності мережі, так і по надійності обслуговування абонентів.

Виконання зазначених вимог пов'язане з необхідністю узагальнення накопиченого світового досвіду в сфері телекомунікацій і залежить від ступеня впровадження передових технологій, пов'язаних з передачею та обробкою даних.

Нові технології, такі, як, NGN и MPLS, дозволяють створювати ефективні мережі різного масштабу. Але забезпечення необхідного часу реакції ускладнено через такі причини [51]:

- висока інтенсивність та різноманітність потоків даних,
- складна взаємодія розподілених сервісів,
- обмежена швидкість транспортування,
- недостатня швидкість узгодження неоднорідних компонент трафіку.

Управління потоками даних призначено для обмеження навантаження ресурсів мережі і забезпечення прийнятної швидкості передачі даних. Методи

управління потоками даних в комп'ютерних мережах відповідають сучасним концепціям мережевого управління [52, 53]. Завдяки цим методам забезпечується збалансованість у завантаженні комп'ютерної мережі, підвищується її продуктивність, однак не враховуються ймовірно-часові характеристики потоків даних.

Однак існуючі методи управління розподілом трафіка в комп'ютерних мережах, в умовах зростаючих його обсягів не здатні забезпечити вимоги до швидкості передачі даних.

Питання аналізу та синтезу комп'ютерних мереж розглядаються в [54]. Але розгляд структури мережі як сукупності вузлів і зв'язків між ними, все ж є недостатнім для досліджування характеристик трафіку.

Структура комп'ютерної мережі є основним чинником, що впливає на якість передавання даних до абонента, і, відповідно, на якість телекомунікаційних послуг. Тому аналіз структури є необхідною умовою при виборі варіантів складу телекомунікаційних послуг [55].

Часто для розрахунку параметрів трафіку, а також завантаження вузлів комп'ютерної мережі, застосовують математичні моделі у вигляді систем масового обслуговування (СМО). Використання СМО дає можливість проводити аналіз роботи мережі зі складною структурою і різноманітними дисциплінами обслуговування абонентів. Однак, застосування для аналізу мереж СМО пов'язане з наступними особливостями [56]:

- дані, які надходять по каналах зв'язку, розглядаються в СМО як запити на обслуговування, що може призвести до неадекватності моделі;
- при аналізі структури комп'ютерної мережі із застосуванням моделей СМО вважається, що інтенсивність трафіку для конкретного вузла мережі дорівнює інтенсивності потоку запитів, що виходять з цього ж вузла, що також не завжди виконується;
- завантаження каналів зв'язку визначається інтенсивністю трафіку всіх типів, які передаються каналом;

- по каналах зв'язку і через вузли мережі можуть передаватися і транзитні дані;
- не всі результати аналізу СМО потрібні при аналізі мережі.

Необхідний достатньо складний аналіз конкретної мережі при підготовці даних для моделювання. Це обумовлено тим, що комп'ютерні мережі в сфері телекомунікацій характеризуються великою розмірністю.

Характеристики розглянутих методів приведено в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Основні методи аналізу структури комп'ютерних мереж

<i>Методи аналізу структури КМ</i>	<i>Переваги застосування</i>	<i>Недоліки</i>
Методи теорії графів	дозволяють наочно відображати структури складних систем і процесів, що відбуваються в них	не враховують залежність характеристик структури мережі від параметрів прикладних завдань
Методи аналізу систем масового обслуговування	дають можливість проводити аналіз роботи мережі зі складною структурою і різноманітними сервісами	неможливе застосування засобів опису структури і розподілу потоків для великої кількості вузлів мереж
Методи сервіс-орієнтованого підходу	дозволяють досліджувати процеси обміну інформацією між вузлами мережі, які споживають різні телекомунікаційні послуги	формалізація уявлення трафіку недостатня і обмежується моделюванням окремих аспектів функціонування мережі
Методи імітаційного моделювання	надають можливість переходу від одного дискретного проміжку часу до іншого (процесно-орієнтована модель), що в свою чергу дозволяє проводити моделювання у середовищі, де стан системи швидко змінюється у певні проміжки часу	через потребу багаторазово відтворювати імітаційний експеримент варіюючи вхідні дані завдання, потребується значні витрати машинного часу



При модернізації комп'ютерних мереж особливу увагу слід приділяти підвищенню пропускної спроможності каналів і ліній зв'язку, які дозволять поліпшити характеристики телекомунікаційних послуг.

Відзначимо, що особливістю трафіку багатьох телекомунікаційних мереж є наявність сильних викидів відносно низького середнього рівня завантаження. Тому, незважаючи на значний розвиток технологій передачі даних, забезпечити сучасні вимоги до якості телекомунікаційних послуг можливо за рахунок модернізації структури комп'ютерні мережі.

Існують публікації з дослідження та розробці методів побудови мультисервісних інфокомунікаційних мереж [57, 58]. Проводиться аналіз трафіку та визначення його параметрів із застосуванням статистичного аналізу, математичного моделювання, статичний та динамічний аналізу потоків даних [59 - 61].

Управління розподілом трафіка відбувається на основі системних методів і алгоритмів управління та оптимізації характеристик мереж [62]. Вказані методи дозволяють прогнозувати стан і динаміку зміни трафіка. Метою є мінімізація втрат пакетів і затримок, оптимізація пропускної спроможності мережі [63].

Смуга пропускання потребує значної уваги при дослідженні комп'ютерних мереж. Більшість існуючих методів аналізують можливість передачі параметрів трафіка безпосередньо алгоритмам управління [64].

Для оцінювання параметрів комп'ютерних мереж використовують такі методи:

- метод оцінки розмірів буферів фільтрації комунікаційного устаткування [65];
- метод оцінки функції щільності розподілу трафіка;
- методи управління перерозподілом пропускної здатності віртуального з'єднання з урахуванням пріоритетів між інтегральними потоками даних [63].

Застосування вказаних методів дозволяє отримати оцінки параметрів мережі і врахувати їх в алгоритмах модернізації структури мережі

### **1.5 Роль моделювання в прогнозуванні характеристик комп'ютерних мереж**

Властивості комп'ютерного трафіка були досліджені та формалізовані із застосуванням різних методів та підходів [66, 67].

Для моделювання мереж застосовуються імітаційні моделі, які поділяються на основні типи: моделі системної динаміки, дискретно-подієві, моделі динамічних систем та агентні [68].

Для дослідження динамічних процесів застосовуються моделі системної динаміки, які дозволяють моделювати складні системи зі зворотнім зв'язком. Процеси в такому випадку зображені у вигляді діаграм, складених з прямих та зворотних зв'язків. Особлива увага приділяється моделюванню саме цих зв'язків [69].

Для симуляції роботи комп'ютерної мережі часто використовують моделі дискретно-подієві та моделі динамічних систем [70].

При дискретно-подієвому моделюванні основна увага приділяється або переходам від події до події (подієво-орієнтована модель), або від одного дискретного проміжку часу до іншого (процесно-орієнтована модель). Цей тип імітаційного моделювання застосовується у разі, якщо швидко змінюється стан системи у певні проміжки часу. Така модель зображується у вигляді графу подій.

Моделювання динамічних систем дозволяє описати процеси у вигляді алгебраїчних рівнянь, алгоритмів, блок-схем та диференціальних рівнянь.

Агенте моделювання оперує поняттям «агент» - що являє собою деяку сутність, яка може проявляти активність, має власну поведінку, може приймати

рішення на основі поточного стану системи. Таке моделювання використовують для аналізу інтелектуальних децентралізованих систем і отримують інформацію щодо взаємодії її складових [71].

Існують дослідження, пов'язані з проблемами підвищення якості зв'язку саме для транспортних процесів комп'ютерної мережі [72].

При дослідженні трафіку аналізують продуктивність протоколу TCP, застосовуються методи управління потоками даних (Tahoe, Vegas, Reno, Newreno, Random Early Detection та ін.). Такі методи орієнтовані на статичні або квазістатичні умови функціонування комп'ютерних мереж і не мають змоги визначити причини втрати пакетів [73 - 75]. Дослідники протоколу TCP вирішують також завдання забезпечення взаємодії з протоколами інших рівнів моделі OSI (мережевого та канального).

Більшість типів трафіка в комп'ютерних мережах чутливі до перевантажень, затримок та втрати пакетів з даними, таким чином, вимагають реалізації методів управління потоками даних [76, 77]. Тому, ефективне управління потоками даних, в тому числі шляхом модернізації структури мереж, є актуальним питанням при наданні телекомунікаційних послуг.

У статті [3] визначені основні характеристики комп'ютерної мережі, які мають вплив на процеси передачі даних, та запропоновано їх формалізоване уявлення для подальшого моделювання. Основними є такі характеристики мережі:

- пропускна здатність (Bandwidth);
- затримки на каналах зв'язку;
- якість обслуговування;
- обсяг помилок під час передачі.

Важливими також є структура та обсяги трафіку (вимог на передачу), які виникають на протязі певного часу. Моделювання поведінки комп'ютерної мережі слід проводити на трьох нижніх її рівнях: фізичному (топология мережі), канальному (обсяг пакетів, та втрат під час передачі) та мережевому (побудова маршрутів для передачі пакетів даних).

Під час моделювання виникає завдання перерозподілу трафіку у випадку перевантаження транспортних вузлів або каналів передачі даних. В комп'ютерних мережах воно вирішується на транспортному рівні за допомогою так званого плаваючого вікна.

Одним із способів дослідження чинників неякісного зв'язку є моделювання поведінки мережі на протязі певного часу. При цьому аналіз мережі слід проводити з боку різних поглядів на її функціональні властивості. Однією з таких властивостей є навантаження мережі. Якщо провести попередні дослідження мережевого трафіку на протязі часу, то його величина є доволі передбачуваною, тому її можна використовувати як сталу величину [8]. Це відкриває можливості застосовувати до комп'ютерних мереж не тільки агентне моделювання, а й методи побудови імітаційних моделей.

З погляду модернізації структури мережі найбільш ефективними є наступні дослідження:

- фрактальний (самоподібний) аналіз властивостей мережі [78 - 80];
- аналіз мережевого трафіку на основі потоків «джерело-отримувач» (Origin-Destination flows) [81].

Варто зазначити, що вказані методи надають схожі висновки, що комп'ютерній трафік має чітко виражені фрактальні властивості. Це особливо видно на великих інтервалах часу, таких як тижні, місяці.

Тому важливим завданням є аналіз даних про обсяг трафіку з різних мереж за різні періоди часу. Треба виявити закономірності у часових рядах та довести статистичну значимість цих гіпотез.

Самоподібні властивості веб-трафіку дають можливість будувати імітаційні моделі для прогнозування параметрів мережі [82 - 84], моделювати стан серверів та навантаження на канали зв'язку [85 - 87].

Важливим фактором для збереження адекватності моделі є вхідні дані для моделювання [88]. Особливу увагу слід приділити кількісним оцінкам обсягу трафіку, його маргінальним значенням (максимальному та мініимальному) і середньому значенню за певний проміжок часу.

Виходячи з вищевикладеного, є необхідність у розробці методів і засобів аналізу та модернізації мережі, які були б зручними та ефективними. Серед існуючих програмних засобів слід відзначити так як Cisco Packet Tracer, GNS3, Unetlab, які використовуються проектувальниками та адміністраторами мережі для її дослідження.

Вказані програмні продукти дозволяють аналізувати процеси маршрутизації, надають візуальне представлення робочих станцій, комутаторів та маршрутизаторів мережі. Але вони не містять засобів масштабування, не надають змоги моделювання навантаження мережі, не враховують особливості зміни трафіку.

Існуючі програмні продукти, які дозволяють моделювати структуру і поведінку комп'ютерної мережі представлені в таблиці 1.2.

З основних їх недоліків варто виділити:

- застарілі підходи до опису вхідного трафіку;
- вузька спеціалізація, з точки зору мережевих технологій і протоколів;
- досить висока вартість ліцензії.

Зазначені вище програмні системи самі генерують модель мережі на основі вихідних даних про її топологію і використовуваних протоколах, про інтенсивності потоків запитів між комп'ютерами мережі, протяжності ліній зв'язку, про типи використовуваного обладнання і додатків. Програмні системи моделювання можуть бути вузько спеціалізованими і не дозволяють імітувати мережі різних типів. Якість результатів моделювання в значній мірі залежить від точності вихідних даних про мережі, переданих в систему імітаційного моделювання. А враховуючи, що імітаційна модель даних у програмних системах описується на спеціалізованих мовах моделювання, таких як SIMULA, GPSS, SIMDIS, можна прийти до висновку, що для роботи з даними програмними продуктами необхідний спеціально навчений персонал.

Таблиця 1.2 - Порівняльна характеристика програмних продуктів, що дозволяють моделювати структуру і поведінку комп'ютерної мережі

<i>Компанія і продукт</i>	<i>Тип мережі</i>	<i>Підтримувані ОС</i>	<i>Функції</i>
CACI Product, COMNET III	LAN / WAN	Windows, Windows NT, OS/ 2, Unix	Мережі X.25, ATM, Frame Relay, зв'язку LAN-WAN
Make System, NetMaker XA	LAN	AIX, Sun OS, Sun Solaris	Перевірка даних про топологію мережі; імпорт інформації про трафік, одержуваного в реальному часі
Analysis Center, MIND Network Design and Analysis Group, AutoNet / Designer	WAN	DOS, Windows	оптимізація мережі, визначення оптимального розташування концентратора в КМ
Network Design and Analysis Group, AutoNet / MeshNET	WAN	Windows, OS / 2	Моделювання смуги пропускання, оптимізація витрат на організацію КМ, шляхом імітації пошкоджених ліній, підтримка тарифів АТ & Т

### 1.6 Висновки до розділу. Постановка завдання

Проведено розгляд стану індустрії інтернет телекомунікацій на сьогоднішній день, а також проблем, які виникають через безперервний розвиток та збільшення кількості мереж.

Надано основні поняття в області телекомунікацій. Проаналізовано напрямки розвитку телекомунікаційних технологій.

Проаналізовано чинники впливу зовнішнього середовища на функціонування комп'ютерних мереж. Звіти компаній Ericsson та Cisco демонструють теперішнє та прогнозоване навантаження на мережі передачі даних у різних перспективах, в тому числі, із кластеризацією за типами наданих послуг та сервісів. Через це постає закономірне питання збільшення потужностей комп'ютерних мереж.

Розглянута концептуальна основа та досліджено розвиток методів модернізації комп'ютерних мереж. Зроблено висновок про необхідність приймати ефективні рішення щодо вибору стратегій розвитку мережі для максимального використання її ресурсів. Існуючі інформаційні технології, на яких засновані методи управління розподілом трафіка в комп'ютерних мережах, в умовах зростаючих обсягів циркулюючої інформації не здатні забезпечити вимоги до оперативності обміну інформацією. Структура комп'ютерної мережі є основним чинником, що впливає на якість передавання даних до абонента, і, відповідно, на якість телекомунікаційних послуг. Завдання забезпечення якісних телекомунікаційних послуг потребує дослідження, аналізу та моделювання трафіку.

Досліджено роль моделювання в прогнозуванні характеристик комп'ютерних мереж і зроблено висновок, що важливим завданням є статистичний аналіз даних про обсяг трафіку з різних мереж за різні періоди часу.

Зроблено огляд існуючих програмних продуктів дослідження та моделювання комп'ютерних мереж.

На основі проведених досліджень визначено мету роботи та сформульовані завдання.

Метою дисертаційного дослідження є підвищення обґрунтованості прийняття рішень з формування складу телекомунікаційних послуг на основі

аналізу та модернізації структури комп'ютерної мережі шляхом імітаційного моделювання з урахуванням вхідного трафіку.

Для досягнення зазначеної мети треба вирішити такі завдання:

1. Проаналізувати проблеми надання телекомунікаційних послуг та тенденції зростання вхідного трафіку в комп'ютерних мережах.
2. Розробити метод прийняття рішень з формування складу телекомунікаційних послуг з урахуванням вхідного трафіку та структури комп'ютерної мережі.
3. Розробити метод моделювання та оцінки параметрів комп'ютерної мережі.
4. Розробити розрахункову модель для виявлення перевантажень в мережі.
5. Розробити прикладну інформаційну технологію імітаційного моделювання комп'ютерної мережі.
6. Впровадити результати дисертаційного дослідження в практику надання телекомунікаційних послуг та модернізації комп'ютерних мереж.

Результати даного розділу опубліковано в роботах [1, 2, 13].



## РОЗДІЛ 2

# МЕТОД ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ З ФОРМУВАННЯ СКЛАДУ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ ПОСЛУГ ТА МОДЕЛІ АНАЛІЗУ ВХІДНОГО ТРАФІКУ

### **2.1 Метод прийняття рішень з формування складу телекомунікаційних послуг**

Розглянемо основні параметри якості телекомунікаційних послуг, які відображають можливість і ефективність транспортування інформації в комп'ютерній мережі. Ступінь функціональності в часі характеризує можливість надання телекомунікаційних послуг в повному обсязі з необхідним рівнем якості протягом певного періоду або в конкретний момент часу. Працездатність мережі пов'язана з поняттями надійності та живучості.

*Надійність* комп'ютерної мережі означає здатність забезпечувати зв'язок, зберігаючи в часі значення встановлених показників якості в заданих умовах експлуатації [98]. Вона залежить від внутрішніх чинників: випадкових відмов технічних засобів, дефектів технології виготовлення або помилками персоналу. Є різні показники надійності: відношення часу працездатності мережі до загального часу її експлуатації, ймовірність безвідмовного зв'язку та ін. Важливим структурним показником є кількість незалежних шляхів передавання інформації, які можуть бути визначені між вузлами мережі.

*Живучість* комп'ютерної мережі характеризується здатністю зберігати повну або часткову функціональність під впливом руйнуючих причин, які виникають поза межами мережі й призводять до виходу з ладу чи значних пошкоджень деякої частини її елементів [89]. Чинники втрати живучості можуть бути як зовнішні так і внутрішні. Зовнішніми чинниками може бути землетрус або обстріл під час воєнних дій. Також в сучасних умовах є висока

ймовірність навмисних злочинних дій. Живучість може вимірюватись такими показниками:

- вірогідністю того, що між будьякою заданою парою вузлів мережі можна передати обмежений обсяг інформації після впливу руйнівних факторів;
- мінімальною кількістю вузлів та/або зв'язків мережі, вихід з ладу яких призводить до порушення її зв'язності;
- середньою кількістю пунктів, які залишаються зв'язними при одночасному пошкодженні декількох ліній зв'язку та ін.

Така характеристика як *пропускна здатність* мережі важлива для дослідження можливості обслуговувати необхідне навантаження, що вимагаються певними телекомунікаційними послугами. Пропускна здатність можна спрогнозувати або оцінити шляхом моделювання. При цьому застосовують методи визначення максимального потоку інформації між двома пунктами (джерело-стік), або пропускну спроможність перетину мережі, що є найвужчим місцем. Оцінка пропускну здатності мережі напряму впливає на параметри якості телекомунікаційних послуг.

З точки зору оператора зв'язку якість (а відповідно і конкурентоспроможність послуг) телекомунікаційної мережі визначається такими показниками як рентабельність і вартість. Телекомунікаційна мережа є рентабельною, якщо витрати на її організацію і забезпечення працездатності окупаються доходом від наданих абонентам послуг. Основна економічна характеристика мережі - це загальномережеві витрати, до яких належать витрати на експлуатацію й управління [90].

Розглянемо напрямки стратегічного управління конкурентоспроможністю телекомунікаційних послуг оператора зв'язку. Еволюція телекомунікацій відбувається в напрямку конвергенції, тобто забезпечення однакового складу послуг різними за технологічними можливостями мережами. Конвергенція може відбуватися на основі злиття різних мереж або мереж декількох операторів. Злиття може здійснюватися для мереж з різними технологіями, для

локальних і територіальних мереж, провідних та безпроводних, стаціонарних та мобільних мереж, на рівні доступу та транспортування. Конвергенція послуг розширює їх можливості. Прикладом є мультимедійні комунікації.

Необхідність передавання даних на значні відстані підвищила важливість аналізу мереж на транспортному рівні.

Завдання формування складу телекомунікаційних послуг є фактором інтелектуалізації мереж. Існує концепція інтелектуальної мережі IN з використанням елементів штучного інтелекту, синтезаторів і розпізнавачів мови [91]. Концепція інтелектуальної мережі передбачає динаміку складу телекомунікаційних послуг. При цьому на основі класифікації окремих складових послуг можна сформувати будь-який вид послуги на потребу абонента, який є незалежним від виду обслуговування та від функціональних блоків SIB (Service Independent Block).

До того ж відповідно до вимог абонентів щодо якості телекомунікаційних послуг здійснюється формування топології мережі, вибір транспортних протоколів, апаратного та програмного забезпечення. Критеріями якості в першу чергу є відсутність затримок, стійкість до помилок, безпека, безкоштовне надання деяких послуг. Необхідно також зважати на те, що вимоги до мережі змінюватимуться в процесі її експлуатації. Але, основним чинником, який треба враховувати при аналізі функціонування мережи, є характеристики мережевого трафіку [92].

Мережевий трафік вимірюється такими даними [89]:

- одиниці даних (біти, байти, октети, повідомлення, блоки) та їх об'єднання (файли, пакети, кадри, комірки);
- швидкість передавання - кількість одиниць даних за одиницю часу (пакетів в секунду, байтів в секунду) або час, необхідний для передавання одиниці даних мережею;
- реальний розмір переданих даних складається з самих даних і їх інформаційного опису (заголовків протоколів).

При аналізі трафіку треба враховувати такі характеристики:

- вибухоподібність - темп посилення порцій трафіку в мережу (відношення пікового значення трафіку до середнього за період спостереження);
- терпимість до затримувачів - реакція різних видів трафіку на всі види затримок у мережі (аудіо та відео є трафіком реального часу). У деяких випадках тривалі затримки стають причиною переривання сесії та необхідності її відновлення;
- необхідна пропускна здатність. Величина затримок залежить від смуги пропускання.
- чутливість до втрачання пакетів (файловий сервіс, сервіс баз даних, електронна пошта). Такі втрати часто стають причинами знецінення усієї інформації.

Таким чином, для надання якісних телекомунікаційних послуг треба гарантувати високу пропускну здатність, швидкий час реакції мережі та інші параметри. Існує технологія служби якості обслуговування (Quality of Service, QoS), яка застосовує розподіл трафіку за категоріями з призначенням пріоритетів [93].

Для конвергентних платформ надання послуг слід враховувати такі характеристики:

- обізнаність про активні сесії та здатність керувати ними незалежно від місця розташування учасників сесії та методу їх доступу;
- забезпечення безперервності послуги у разі застосування фіксованих та мобільних мереж (незалежно від виду трафіку).

Для комбінованих послуг (Triple Play) важливими є такі показники [94]:

- швидкість передавання даних (залежить від смуги пропускання) як до абонента («вниз») так і від абонента («вгору»);
- QoS (диференційований, пріоритетний або без гарантії з можливістю надавати чотири послуги).

Існує стандарт, який визначає показники, параметри якості та методи випробування якості телекомунікаційних послуг із передачі даних і доступу до

Інтернету. Він є інструментом державної політики із забезпечення надання телекомунікаційних послуг належного рівня якості та задоволення потреб споживачів. Визначає вимоги до рівня якості телекомунікаційних послуг. Стандарт розроблено на основі національних нормативних документів, документів Європейського інституту стандартизації електрозв'язку (ETSI) та рекомендацій Сектору стандартизації телекомунікацій Міжнародного союзу електрозв'язку (ITU-T) [95]. В таблиці 2.1 приведено фрагмент відповідної таблиці зі стандарту, з якої видно, що структура мережі та її відповідні часові характеристики (час виконання заявки на підключення, сукупний час, протягом якого комп'ютерна мережа є недоступною, час реєстрації в мережі) мають забезпечувати відповідні критерії якості передачі даних.

Оскільки оператори надають набір послуг, то вибір одного з операторів автоматично призводить до необхідності користування всім набором послуг оператора. За таких умов йдеться не про вибір конкретної послуги, а про набір послуг, які надає той чи інший оператор [96, 97].

Розглянемо деякі кількісні вимоги до сучасних IP-мереж. Синхронна передача даних передбачає періодичну генерацію бітів, байтів, або пакетів, які мають бути відтворені приймачем з таким же періодом. Передача інформації такого типу як аудіо, відео, синхронні потоки, не вимагає дуже малої затримки між джерелом і приймачем. Однак необхідно, щоб затримки були передбачувані, тому що тоді часові параметри передачі повідомлень можуть бути відновлені в приймачі.

Вимоги до швидкості передачі інформації для різних послуг дуже варіюються.

Наприклад, передача даних телеметрії в реальному часі вимагає швидкості кілька біт/с, мовна інформація задовільної якості визначає 4 - 32 Кбіт/с, для телефонного зв'язку потрібно до 64 Кбіт/с, передача відео вимагає від десятків Кбіт/с до десятків Мбіт/с (HDTV), залежно від характеристик зображення.

Таблиця 2.1 – Показники та параметри якості послуг із передачі даних і доступу до Інтернету (фрагмент)

<i>Вид показників</i>	<i>Показники</i>	<i>Параметри для розрахунку показників та їх позначення</i>
Показники, які характеризують доступність послуг із ПД і ДІ (Accessibility Performance, AP)	Нормований час виконання заявки на підключення споживача до маражі передачі даних (МПД) ( $T_{нчвз}$ )	Кількість випадків непридатності мережі рухомого (мобільного) зв'язку при спробі доступу ( $N_{внпд}$ ). Загальна кількість спроб доступу за період випробування або звітний період ( $N_{сд}$ ). Тривалість звітного періоду 2) ( $T_{звп}$ )
	Відсоток заяв на підключення споживачів до МПД, виконаних за нормований час (коефіцієнт вчасності підключення) ( $Q_{звнч}$ )	Час виконання заявки на підключення споживача до МПД ( $T_{чвзп}$ ). Кількість заяв на підключення споживачів до МПД, виконаних за нормований час ( $N_{звнч}$ ). Загальна кількість заяв на підключення споживачів до МПД за звітний період ( $N_{зпко}$ ) Тривалість звітного періоду 2) ( $T_{звп}$ )
Показники, які характеризують доступність послуг із ПД і ДІ (Accessibility Performance, AP)	Відсоток успішних реєстрацій в мережі ( $Q_{прм}$ ).	Кількість успішних спроб реєстрації в мережі за період випробування ( $N_{успрм}$ ) Загальна кількість спроб реєстрації в мережі за період випробування ( $N_{спррм}$ )
	Відсоток відмов ( $Q_{відм}$ )	Сукупний час, протягом якого МПД є недоступною ( $T_{недост}$ ). Тривалість періоду випробування ( $T_{випр}$ )
	Відсоток реєстрацій, які відповідають нормам за часом реєстрації в мережі ( $Q_{чвзв}$ )	Час реєстрації в мережі ( $T_{чзвк}$ ). Кількість реєстрацій, які відповідають нормам за часом реєстрації в мережі ( $N_{чвзв}$ ). Загальна кількість реєстрацій, зроблених за період випробування або за звітний період ( $N_{зкпв}$ ) Тривалість періоду випробування ( $T_{випр}$ ). Тривалість звітного періоду 2) ( $T_{звп}$ )

Вимоги до часу доставки теж різні. Так, для мовного зв'язку допускається наскрізна затримка від 12 мс при відсутності ехокомпенсації (G.164), і до 400 мс при її наявності. Для неінтерактивних застосунків (надання відеоінформації за запитом) допускаються затримки більше 500 мс [98].

В процесі передачі даних по мережах з комутацією пакетів може статистично змінюватися затримка (джитер) при обробці черг у вузлах мережі. Має бути передбачене необхідне місце в буферному накопичувачі. Так, якщо припустимі втрати 0,1% пакетів, розмір буфера має бути на рівні, що перевищує змінну складову затримки вступників пакетів в 99,9% випадків. Таким чином, високий рівень джитер змушує миритися або з великою кількістю місць в буферному накопичувачі і, як наслідок, з великими затримками, або з високим рівнем втрат інформації.

Як було зазначено раніше, значний приріст програмних засобів. мережевих потужностей за останні 10-15 років був викликаний значним ростом кількості підключень до мережі інтернет. Тож є очевидною актуальність інноваційного розвитку компаній, які надають доступ до мережі інтернет, або локальних мереж, незалежно від способу підключення (дротовий, бездротовий), та використовуваних технологій (WiFi, GPRS, 3G).

В залежності від цілей розвитку компанії розрізняють три основні види стратегії [6]:

- стратегія зростання, що включає підстратегії концентрації, інтеграції та диверсифікації (рис. 2.1);
- стратегія стабілізації, що включає напрямки реінжинірингу (в тому числі модернізацію структури мережі), забезпечення масовості послуг та припинення інвестування;
- стратегія захисту та виживання, що включає процеси злиття та поглинання.

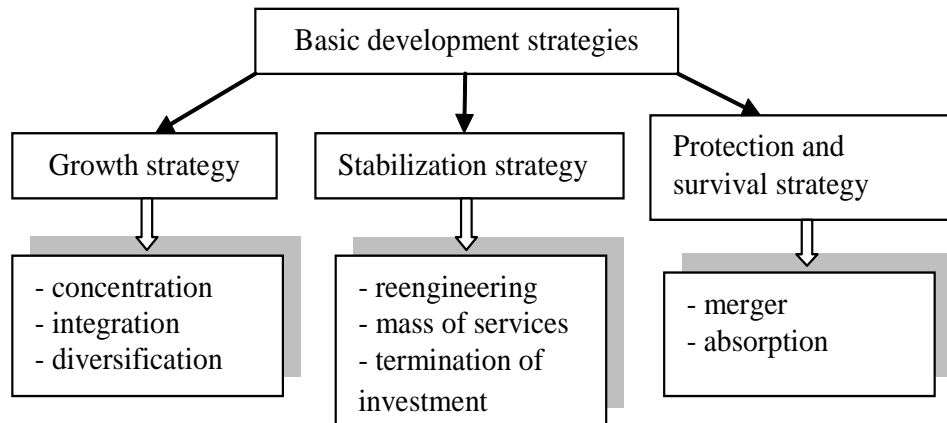


Рисунок 2.1 - Основні стратегії розвитку компаній надання послуг зв'язку

Стратегії зростання забезпечують розширення ринкової діяльності, збільшення активів оператора, зростання обсягів інвестування. Стратегії стабілізації, захисту і виживання застосовуються великими операторами, які вже домінують на даному ринку та спрямовані на його збереження. Відбувається пошук внутрішніх резервів і вигідних можливостей з мінімальним ризиком. Дану стратегію застосовують підприємства на стадії зрілості життєвого циклу.

Крім того, існує ще стратегія скорочення, що включає реструктуризацію бізнесу, банкрутство та ліквідацію. Стратегії скорочення надають змогу звести до мінімуму витрати компанії на ті бізнес-процеси, які є збитковими.

Вказані характеристики якості телекомунікаційних послуг, параметри мережі і можливі стратегії розвитку компаній є складовими елементами дворівневої системи прийняття рішень. На першому рівні приймається рішення оператором телекомунікаційних послуг щодо стратегії її діяльності. У одному з варіантів (що застосовується найчастіше) приймається рішення другого рівня щодо модернізації структури комп'ютерної мережі.

Формалізовано задача прийняття рішень *першого рівня* складається з таких компонент:

$$\langle S_0, T, R \mid S, P, B, Y, f \rangle$$



Вихідні данні для прийняття рішення:

$S_0$  – вихідна проблемна ситуація: зростання трафіку та наявність на ринку нових телекомунікаційних послуг;

$T$  – час, яким володіє особа, що приймає рішення (ОПР) для прийняття рішення: для аналізу переваг нових послуг, прогнозування вхідного трафіку, моделювання структури мережі, оцінки її параметрів та реалізації процедури вибору рішення;

$R$  – ресурси, необхідні для прийняття рішення: наявність технологій статистичного аналізу та моделювання структури мережі; технічні та технологічні можливості впровадження нової послуги; фінансові та часові ресурси для модернізації мережі.

Складові поцедури прийняття рішення:

$S$  – можливі ситуації: а) параметри наявної мережі дозволяють застосувати нову послугу, б) потрібна модернізація структури мережі, в) немає можливостей для модернізації мережі;

$P$  – множина цілей: забезпечити конкурентоспроможність ТК компанії; розширити коло абонентів; підвищити якість послуг; забезпечити характеристики якості передачі даних, тощо;

$B$  – технологічні, технічні, фінансові, правові обмеження;

$Y$  - варіанти рішення: а) застосувати нову послугу для наявної мережі, б) провести модернізацію структури мережі, в) застосувати стратегію «злиття», г) не змінювати набір послуг;

$f$  – функція переваги – економічна обґрунтованість розширення набору послуг.

Відзначимо, що для прийняття рішення щодо впровадження нової послуги розглядаються варіанти:

- впровадження запропонованої послуги в повному обсязі;
- часткове впровадження запропонованої послуги;

- впровадження запропонованої послуги із модернізацією існуючої мережі;
- відмова від впровадження нової послуги.

При цьому одним з основних чинників для забезпечення якості послуг є показники якості передавання даних.

На *другому рівні* задача прийняття рішення про модернізацію структури мережі складається з наступних компонент:

$$\langle S_{0I}, T_I, R_I \mid S_I, P_I, B_I, Y_I, f_I, L_I(f) \rangle$$

$S_{0I}$  – проблемна ситуація: потрібна модернізація структури мережі;

$T_I$  – час моделювання;

$R_I$  – фінансові та часові ресурси для модернізації мережі.

$S_I$  – ситуація: не виконуються вимоги якості функціонування мережі;

$P_I$  – ціль: забезпечити характеристики якості передачі даних;

$B_I$  – географічні та правові обмеження;

$Y_I$  – рішення: а) додати/видалити вузол (вузли), б) додати/видалити гілку (гілки);

$F_I$  – функція переваги – покращення характеристик мережі;

$L_I(f)$  – критерій прийняття рішення: мінімізація сумарного часу обробки запитів.

Прийняття рішення щодо модернізації топології мережі здійснюється на основі результатів імітаційного моделювання і критерію мінімізації сумарного часу обробки запитів абонентів.

Процес прийняття рішення оператором з впровадження нових телекомунікаційних послуг можна представити наступним чином (рис. 2.2). На цьому рисунку відображено основні процедури обробки інформації, виконавці, та можливі варіанти рішень.

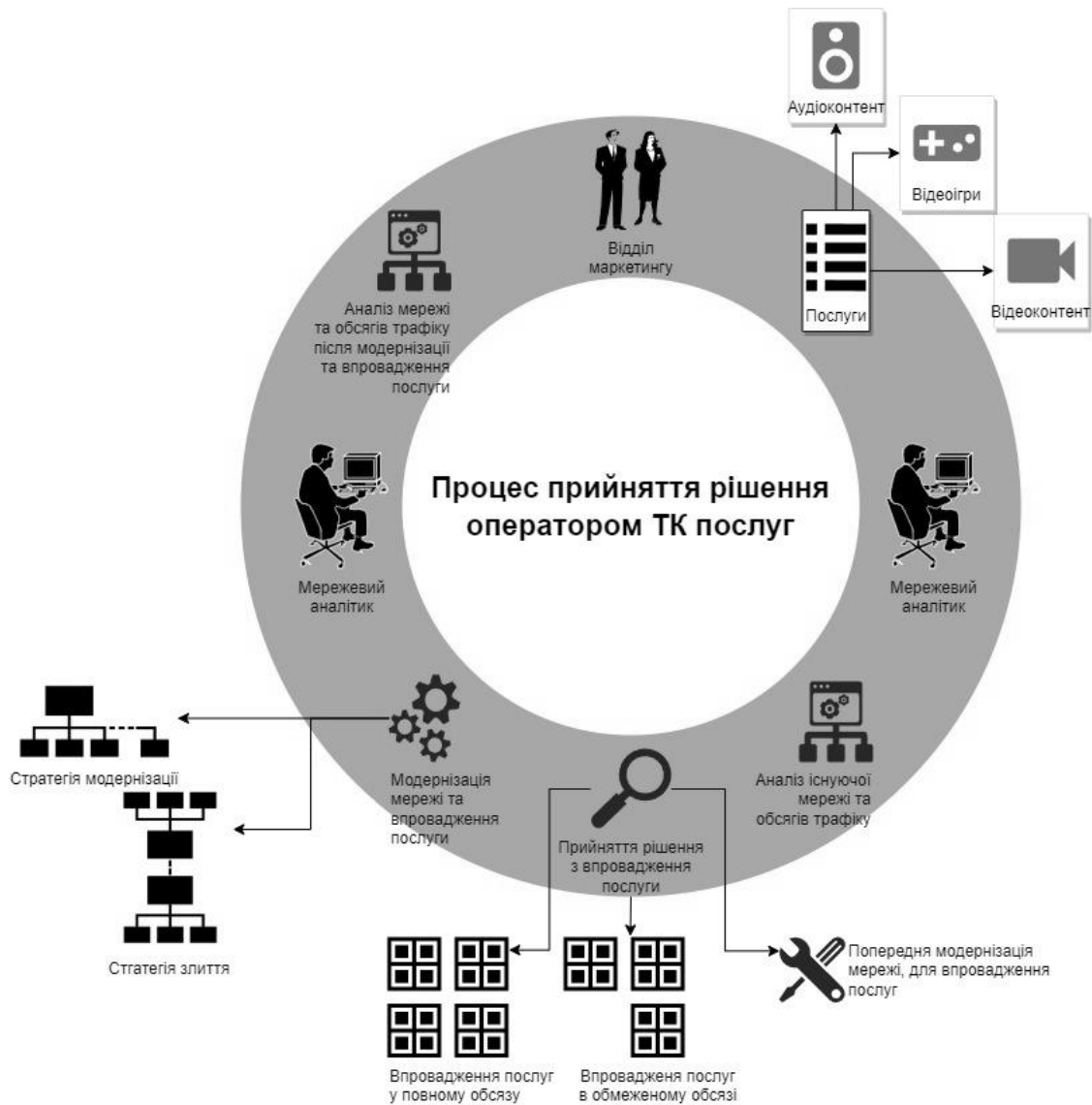


Рисунок 2.2 - Процес прийняття рішення оператором телекомунікаційних послуг

Враховуючи вище викладене, запропоновано метод прийняття рішень з формування складу телекомунікаційних послуг, схема якого представлена на рисунку 2.3.

Опишемо основні етапи методу.

1. Проводиться аналіз ринку операторів зв'язку, прогресивних технологій передачі даних та нових пакетів телекомунікаційних послуг і їх складових. Враховуються сучасні тенденції та попит, вимоги якості щодо нових послуг.



Рисунок 2.3 - Схема методу прийняття рішень з формування складу телекомунікаційних послуг з урахуванням структури мережі

2. Оцінка майбутнього кола абонентів є підставою для подальшого прогнозування навантаження мережі. Врахування показників якості зв'язку надасть змогу оцінити можливість надання нових послуг в комп'ютерній мережі.

3. На основі сучасних тенденцій до використання абонентами різних видів трафіку проводиться аналіз навантаження мережі протягом певних відрізків часу. Виявляються пікові навантаження та робиться прогноз до їх збільшення у майбутньому.

4. З урахуванням динаміки трафіку та структури комп'ютерної мережі проводиться моделювання її поведінки в умовах застосування нових телекомунікаційних послуг і відповідного розширення кола абонентів.

5. При отриманні незадовільних результатів стосовно параметрів якості комп'ютерної мережі виникає необхідність в її модернізації і виборі відповідної стратегії. В складних економічних, політичних умовах сьогодення в умовах воєнного стану вважається недоцільним прийняття стратегії інтенсифікації. Тому в подальшому розглядатися дві стратегії: стабілізації та злиття.

6. Стратегія злиття застосовується в певних економічних і ринкових умовах оператора зв'язку і надає змогу покращити характеристики функціонування комп'ютерної мережі. Стратегія стабілізації надає змогу поліпшити характеристики мережі даного оператора шляхом оптимізації топології мережи.

7. Етап моделювання поведінки комп'ютерної мережі і оцінки її параметрів здійснюється разом з процесом оптимізації у розробленій інформаційній технології. Після проведення відповідних оціночних розрахунків ефективності (з урахуванням витрат на модернізацію структури мережі) може бути прийняте обґрунтоване рішення щодо впровадження нових послуг в діяльності телекомунікаційної компанії.

## 2.2 Формалізація показників якості комп'ютерної мережі

Для аналізу вимог якості телекомунікаційних послуг необхідний комплексний розгляд всіх чинників, що впливають на показники функціонування комп'ютерної мережі. Для цього використовуються різні часткові кількісні показники. Сформуємо модель отримання узагальненого критерію якості комп'ютерної мережі.

Кількість часткових показників  $Q \subseteq D$  для комп'ютерної мережі варіюється від 10 до 50 [3]. Всю множину часткових показників  $Q$  розіб'ємо на підмножини основних показників  $Q_j$  з відповідними ваговими коефіцієнтами  $\lambda_j$ :

$$Q = \bigcup_{j=1}^6 \lambda_j Q_j .$$

Наприклад, визначено такі підмножини  $Q_j$ :

$Q_1$  – показники витрат на нові сервіси та технології зв'язку;

$Q_2$  – показники оцінки функціонування технічних засобів комп'ютерної мережі;

$Q_3$  – показники оцінки функціонування програмного забезпечення комп'ютерної мережі;

$Q_4$  – показники оцінки витрат та технологічне переоснащення обладнання;

$Q_5$  – показники оцінки витрат на удосконалення операційної діяльності;

$Q_6$  – показники оцінки витрат на розвиток інноваційної інфраструктури.

В кожній підмножині  $Q_j$  виберемо один основний показник  $Q_{0j} \in Q_j$ .

Кількісна відносна оцінка  $N_j$  підмножини  $Q_j$  визначається виразом

$$N_j = \frac{Z_j^{(S)}}{Z_j^{(K)}} ,$$

де  $Z_j^{(K)}$  – значення основного показника, що визначається в комп'ютерній мережі;

$Z_j^{(S)}$  – мінімальне значення основного показника, що визначається потребами якості телекомунікаційних послуг.

Задачу багатокритеріального вибору оптимальної структури комп'ютерної мережі можна сформулювати як пошук точки  $z \in \Pi$  ( $\Pi$  – простір варійованих параметрів структури) всередині області допустимих рішень, яка обмежена гіперплощинами:

$$\Pi = \left\{ \Pi_j(N_j) \mid N_j \leq 1, \forall j \in \overline{1,6} \right\}.$$

Множина  $P_d$  допустимих точок простору кількісних оцінок  $P: P_d \subset P$  визначається системою обмежень на функціонування комп'ютерної мережі.

Існують такі способи вирішення оптимізаційної задачі з пошуку точки  $z \in P_d$ :

- перехід від багатокритеріальної задачі до однокритеріальної;
- ранжування часткових критеріїв з подальшою оптимізацією головного критерія;
- послідовна оптимізація всіх критеріїв з урахуванням їх пріоритетності.

Для отримання оптимальної точки в просторі допустимих рішень слід врахувати таку інформацію:

- вагові коефіцієнти для оцінюваних параметрів;
- метод ранжування і параметри поступок по критеріям;
- послідовність застосування часткових критеріїв.

Будемо вважати, що для підмножин часткових показників якості структури комп'ютерної мережі найбільш значущим критерієм є узагальнений критерій  $R$  – сумарний розмір ресурсу для функціонування комп'ютерної мережі. Його числове значення визначається у вигляді функціоналу

$$F(R) = \varphi(t_s, t_c, V_l, V_i, p_c, t_t),$$

де:  $t_s$  – час передачі даних в мережі;

$t_c$  – сумарний час обробки інформації в вузлах мережі;

$V_l$  – сумарний обсяг даних, що передаються у вузли мережі;

$V_i$  – сумарний обсяг даних, що надходять з вузлів мережі;

$p_c$  – пропускна здатність каналів мережі;

$t_t$  – сумарний час обробки даних.

Параметри  $V_l$  і  $V_i$  не накладають істотних обмежень, тому припуститмо, що для  $R$  існує кількісна оцінка для вузлів мережі. Тоді функція  $\varphi$  є лінійною комбінацією змінних  $R_{ij}$ , які визначають обсяг ресурсів для роботи вузлів підмножини  $L_i$ , що характеризується показниками з множин  $Q_j$ .

З урахуванням додаткових даних функціонал  $F(R)$  можна записати як лінійну функцію

$$F(R) = \sum_{j=1}^6 \sum_{i=1}^k \alpha_j \beta_j^i R_{ij}, \quad (2.1)$$

де  $\alpha_j$  – вагові коефіцієнти показників з підмножини  $Q_j$ ;

$\beta_j^i$  – коефіцієнт, який визначає інтенсивність потоку даних підмножини  $L_i$  і використовує ресурс, який характеризується показниками з підмножини  $Q_j$ .

Критерій (2.1) можна застосувати для оцінки структури комп'ютерної мережі. Продуктивність мережі забезпечується мінімізацією вказаного критерія шляхом вибору відповідних характеристик і вузлів комп'ютерної мережі. Таким чином забезпечуються основні показники якості структури мережі.

Розглянемо критерій ефективності передачі даних в комп'ютерній мережі.



Для оцінки ефективності функціонування мережевого протоколу прийнято використовувати такі показники [99]:

- середній час затримки відповідей в мережі;
- середній час знаходження інформації в мережі;
- середня завантаженість мережі;
- середня продуктивність мережі;
- показники надійності;
- показники вартості та ін.

Більшість показників з цього переліку взаємопов'язані, деякі є протирічними, а інші доповнюють один одного. Таким чином, функція оцінки ефективності, яка вимірюється частковими показниками ефективності мережевого протоколу, є багатопараметричною. Слід обрати мінімально необхідну кількість незалежних і найбільш важливих показників.

Позначимо множину таких показників

$$M = \{M^{(1)}, \dots, M^{(i)}, \dots, M^{(I)}\}, \dim M = I.$$

Кожен з вказаних показників можна декомпозувати на підмножини часткових показників другого рівня:

$$M^{(i)} = \{M_1^{(i)}, \dots, M_j^{(i)}, \dots, M_{J_i}^{(i)}\}, \dim M^{(i)} = J_i; i = \overline{1, I}; j = \overline{1, J_i}.$$

Враховуючи, що для якості телекомунікаційних послуг найбільш важливими є часові показники, та крім цього необхідно враховувати ще ряд наступних вимог [99]:

- висока надійність;
- низька вартість;
- висока захищеність;
- високі вимоги до пропускної спроможності мережі;
- висока продуктивність;
- висока достовірність переданих даних;

- висока стійкість до завад тощо,

визначимо множину  $M$  таку, що містить основні показники якості структури мережі:

$$M = \{M_1, M_2, M_3, M_4\},$$

де  $M_1$  – час затримки відповіді у мережі;

$M_2$  – час комутації ;

$M_3$  – розмір інформації, що передається;

$M_4$  – пропускна спроможність ліній зв'язку.

Розглянемо процес обробки інформації у комп'ютерній мережі. Для  $n$ -го запиту від абонента ( $n = \overline{1, h}$ ), що обробляється  $m$ -м каналом мережі ( $m = \overline{1, g}$ ) введемо булеву функцію

$$B_{nm} = \begin{cases} 1, & \text{якщо канал } m \text{ обслуговує ПП } n; \\ 0, & \text{в іншому випадку.} \end{cases}$$

$$M_1 = \{t_{nm}^{(z)}\};$$

$$M_2 = \{t_{nm}^{(k)}\};$$

$$M_3 = \{V_n\};$$

$$M_4 = \{C_{nm}\}.$$

Врахуємо обмеження на час відповіді –  $T_n$  та доступну пропускну спроможність мережі –  $F_m$ .

Тоді узагальнений показник ефективності, що визначає сумарний час обробки запиту на фіксованому часовому інтервалі, визначимо як

$$L(M, S) = \sum_{m=1}^g \sum_{n=1}^h B_{nm} \left( t_{nm}^{(z)} + t_{nm}^{(k)} + \frac{V_n}{C_{nm}} \right) \xrightarrow{S} \min.$$

Значення обраних показників з множин  $M_1$ ,  $M_2$  та  $M_4$  залежать від структури мережі  $S$ .

Виникає оптимізаційна задача вибору раціональної структури мережі: мінімізація сумарного часу обробки запиту абонента на фіксованому часовому інтервалі:

$$L(M_0, S) \xrightarrow{S} \min ,$$

при обмеженнях, що обумовлені характеристиками структури комп'ютерної мережі:

$$\sum_{n=1}^h B_{nm} C_{nm}(S) \leq F_m, m = \overline{1, g}$$

та обмеженнях, обумовлених вимогами якості телекомунікаційних послуг:

$$\sum_{m=1}^g B_{nm} \left( t_{nm}^{(z)}(S) + t_{nm}^{(k)}(S) + \frac{V_n}{C_{nm}(S)} \right) \leq T_n, n = \overline{1, h}.$$

Цей критерій враховує основні параметри якості передачі даних та є узагальненим показником ефективності, що визначає сумарний час обробки запиту на фіксованому проміжку часу. Саме ця цільова функція характеризує головний чинник під час модернізації комп'ютерної мережі — мінімізація затримок, відкладень передачі та ін., що в свою чергу приводить до зменшення кількості часу, потрібного для передачі інформації, що є підвищенням якості обслуговування кінцевого користувача.

### 2.3 Статистичний аналіз та прогнозування обсягів вхідного потоку

Важливою складовою комп'ютерних мереж сьогодення є збір статистичних даних, однак, якщо конкретні показники інтернет провайдерів у більшості випадків є закритою інформацією, то інформація, зібрана на інтернет

хабах є відкритою для аналізу та спостереження. Завданням даного дослідження є аналіз міжнародного трафіку на схожість та самоподібність. Тобто слід показати схожість мережевого трафіку на протязі деякого часу, а також продемонструвати незалежність мережевої динаміки від конкретного місцезнаходження комп'ютерної мережі та її розміру.

Для виконання цієї задачі було проаналізовано хаби таких міст Європи та Америки як: Франкфурт, Гамбург, Амстердам, Нью-Йорк. А також для того, щоб показати актуальність виявлених властивостей в Україні, буде надана відповідна статистика, зібрана по Україні.

Проаналізуємо добове навантаження на мережі у різних країнах, тобто з суттєво різним середнім обсягом трафіку. Треба перевірити гіпотезу про певну закономірність зміни обсягу трафіку впродовж доби та її незалежність від середнього значення, що показує незалежність властивостей експлуатації комп'ютерних мереж від їх географічного розташування.

Нижче наведені статистичні дані щодо мережевого трафіку Німеччини, України, та Америки. Усі графіки зображені у вигляді діаграми з двома осями. По осі X зображений певний відрізок часу (години, дні, тижні), по осі Y – обсяг даних, які передаються у вказаний час.

На рисунку 2.4 зображений веб-трафік одного з найбільших європейських інтернет хабів у Франкфурті [100]. Можна побачити чітко виражену добову закономірність мережевого трафіку на протязі двох днів, а саме його зростання у так звані «години-пік» (біля 20-ї години), та спад трафіку у нічний час (біля 4-ї години).

На рисунку 2.5 зображено веб-трафік за той самий відрізок часу у Нью-Йорку [101]. Тут можна спостерігати схожі властивості, як у Франкфуртському хабі. Але тут вже додатково спостерігається пікове навантаження близько 12-ї години.

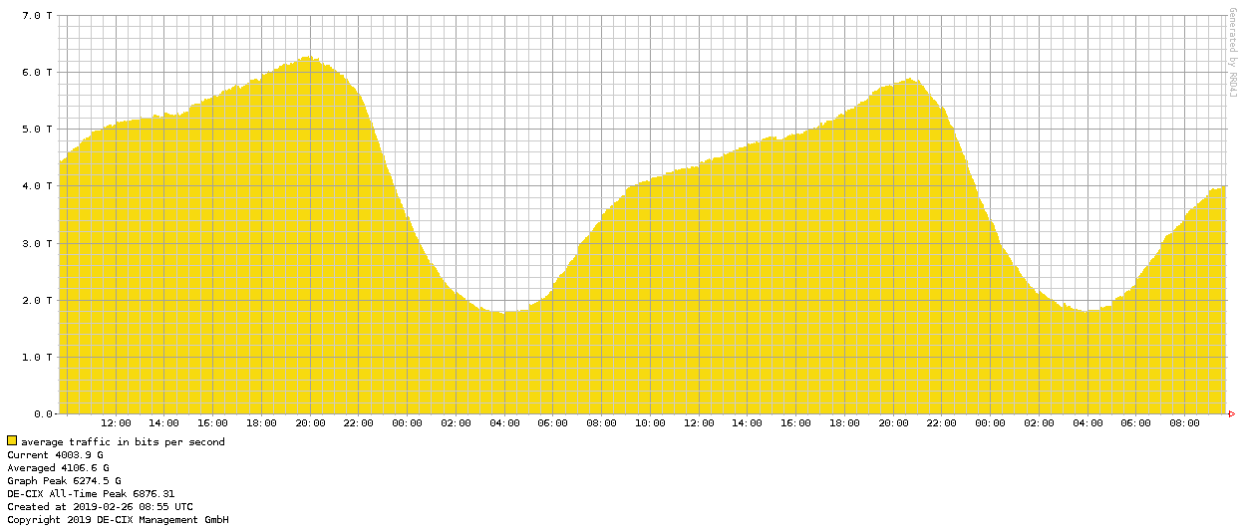


Рисунок 2.4 - Дводенний веб-трафік хаба у місті Франкфурт

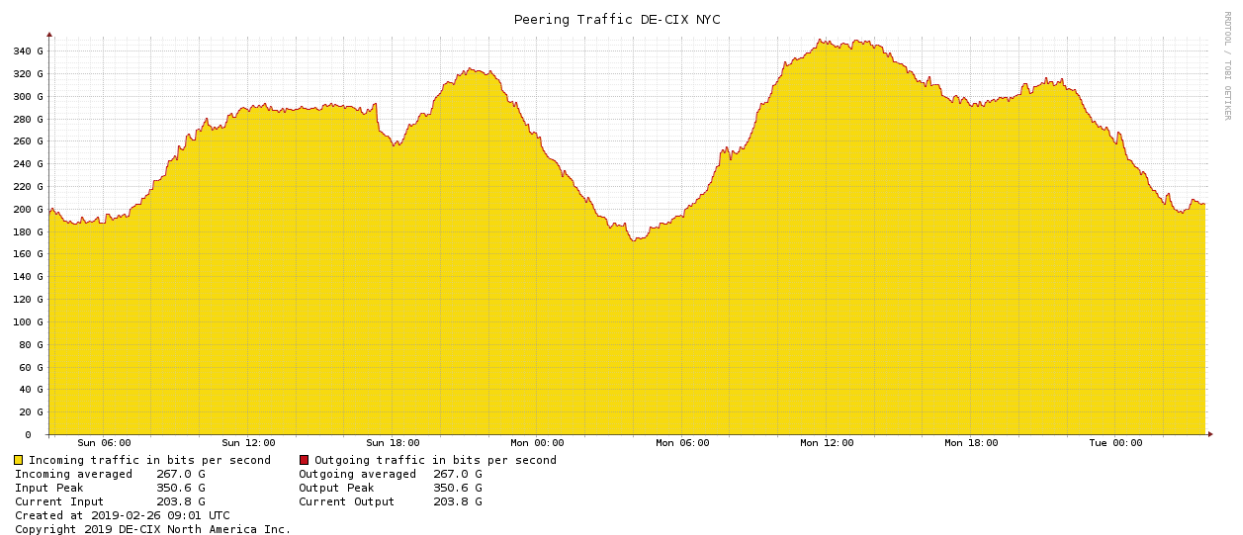


Рисунок 2.5 - Дводенний веб-трафік хаба у місті Нью-Йорк

Для демонстрації схожої картини в Україні, на рисунку 2.6 зображений узагальнений веб-трафік, зібраний з усіх хабів міст України [102]. Тут пікові навантаження розсереджені між 20-ю та 21-ю годинами, а мінімальне – між 4-ю та 6-ю годинами.

Хоча ресурс UA-IX дозволяє переглядати статистику лише за поточну добу, очевидним є схожість веб-трафіку в Україні з усіма вищеописаними.

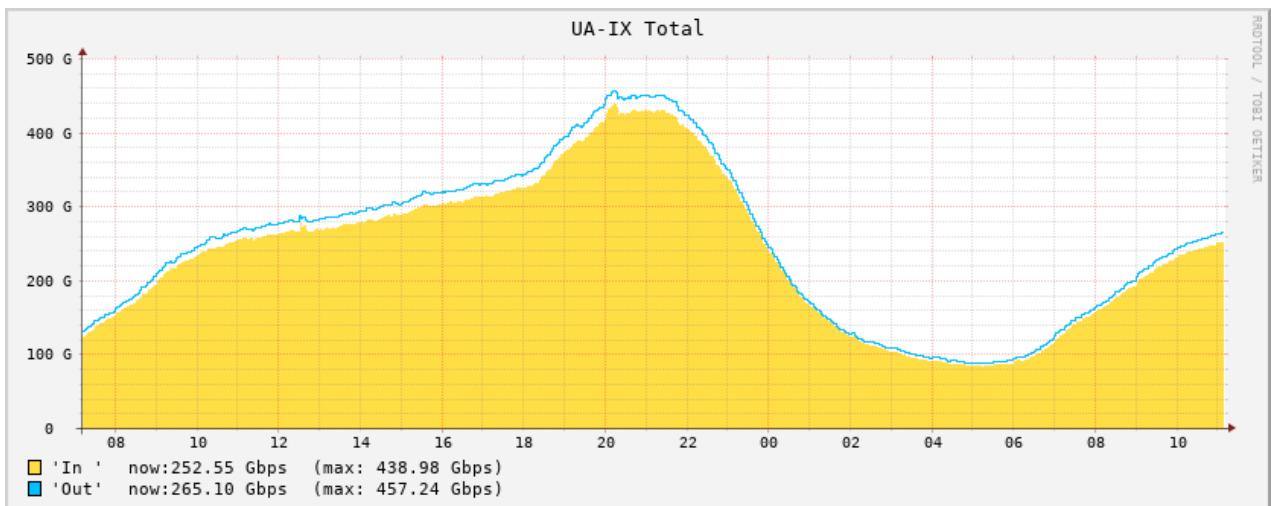


Рисунок 2.6 - Добовий веб-трафік в Україні

Ми побачили візуальну схожість, але відмітили деякі розходження. Треба довести, що закономірність є суттєвою, а розходження – випадковими. Для доказу цієї гіпотези треба порівняти декілька графіків, тобто декілька видів розподілу випадкової величини інтенсивності трафіку на певну годину.

Всі інтернет хаби, які були обрані, відрізняються не тільки географічною віддаленістю, але й обсягами трафіку. Ми можемо умовно поділити ці хаби на великі, середні та малі. Отже хаб у місті Франкфурт є найбільшим, з піковими навантаженнями у декілька терабайтів інформації. Хаб міста Нью-Йорка є середнім за розміром та має пікове навантаження у 250-300 гігабайтів даних. Україна зображена не конкретними містами, а загальним обсягом даних по країні, тому можна віднести хаби України до малих, оскільки сумарний обсяг по країні не набагато перевищує обсяг переданих даних у місті Нью-Йорк, а саме 400 гігабайтів у годину пік.

Розглянемо завдання аналізу подібності трафіку комп'ютерних мереж на протязі певного часу. Це дослідження спрямоване на те, щоб продемонструвати подібність комп'ютерного трафіку на протязі значного відрізка часу, що в свою чергу дозволяє використовувати імітаційне моделювання для передбачення стану комп'ютерної мережі із досить високою вірогідністю.

Для моделювання поведінки комп'ютерної мережі із застосуванням імітаційних моделей важливо використовувати передбачуваний трафік [103 –

105]. Отже потрібно довести, що тенденції, вказані у попередніх даних (рис. 2.4 – 2.6) зберігаються на протязі тривалого часу. Використовуючи інформацію, зібрану у зазначених інтернет хабах можна показати, що відносні коливання мережевого трафіку залишаються незмінними, незважаючи на очевидне та безперервне зростання мережевого трафіку.

На рисунку 2.7 відображений мережевий трафік міста Франкфурт на протязі місяця. Можна однозначно зазначити зберігання показаних вище тенденцій у цей проміжок часу.

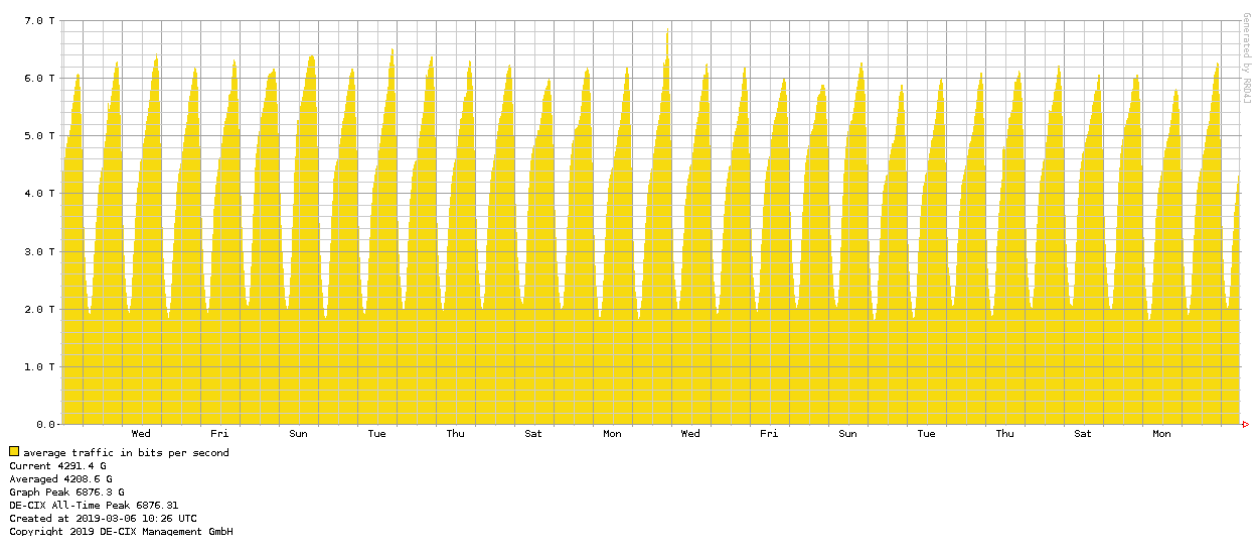


Рисунок 2.7 - Місячний веб-трафік у місті Франкфурт

Однак цей графік не може наглядно показати зростання обсягів трафіку через модернізацію комп'ютерних мереж. Для цього потрібно використовувати річні звіти, або навіть більші періоди часу. Наприклад, нижче наведена статистика міста Франкфурт за рік (рис. 2.8) та за 5 років (рис. 2.9). Річний графік демонструє зростання обсягів трафіку приблизно на 0.5 терабайтів. Найкраще динаміку зростання можна побачити на цьому рисунку. Лише за два роки обсяг трафіку зріс удвічі з 2 терабайтів до 4.

Незважаючи на мінливу динаміку комп'ютерного трафіку та його безперервне зростання, можна виділити патерни поведінки користувачів.

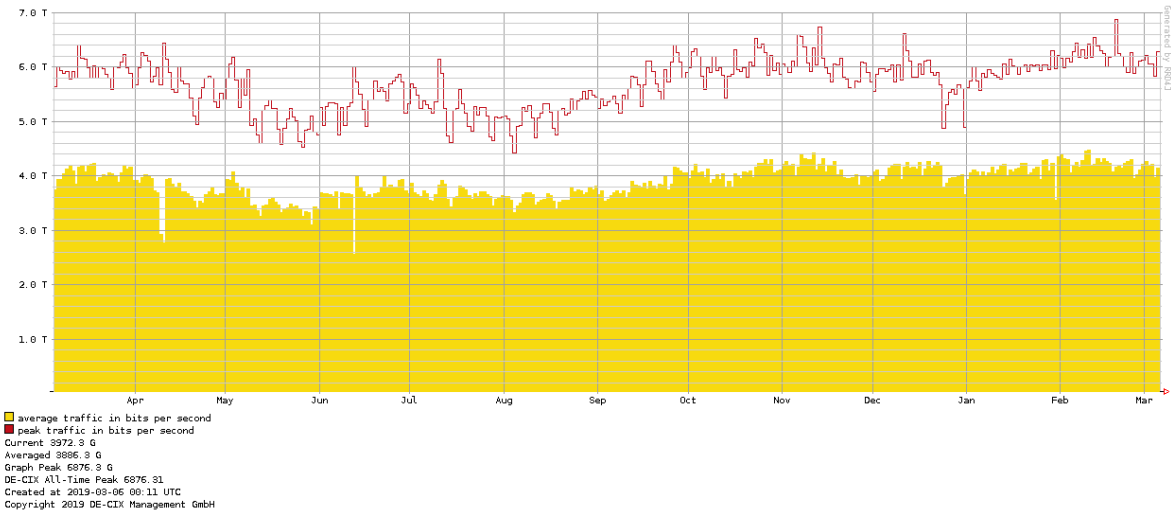


Рисунок 2.8 - Річний веб-трафік у місті Франкфурт

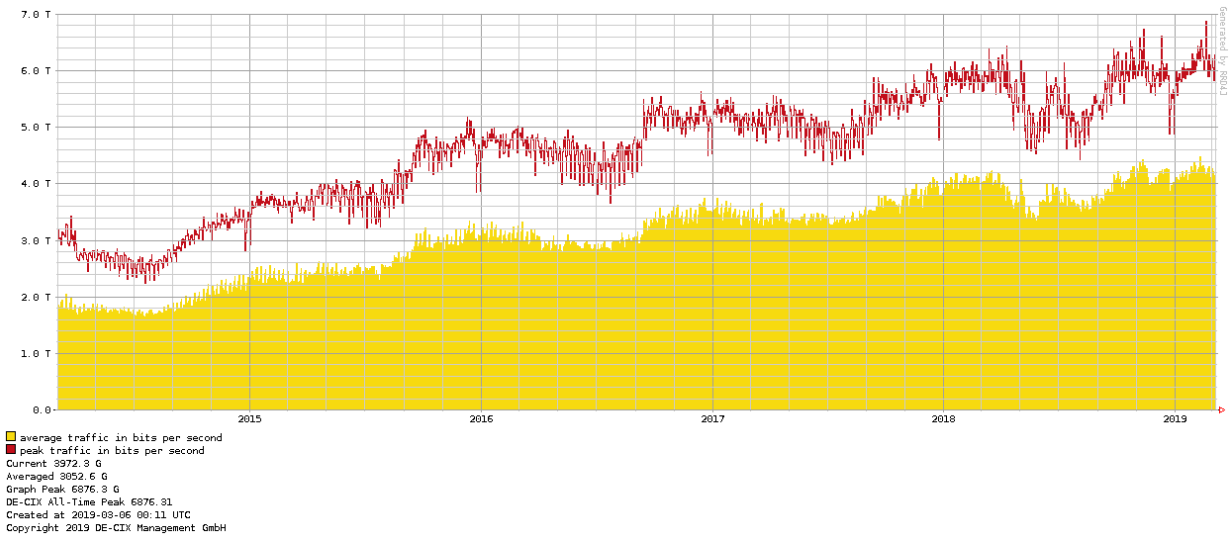


Рисунок 2.9 - П'ятирічний веб-трафік у місті Франкфурт

За даними, приведеними на рис. 2.4 – 2.6, виділимо добову тенденцію та зведемо її на одному лінійному графіку (рис. 2.10). Видно, що графіки схожі за зміною обсягів на певних ділянках часу, але дещо відрізняються.

Щоб зробити аналіз інваріантним відносно абсолютної величини трафіку, пронормуємо вихідні часові ряди, тобто приведемо середнє значення трафіку до нульового значення (рис. 2.11).



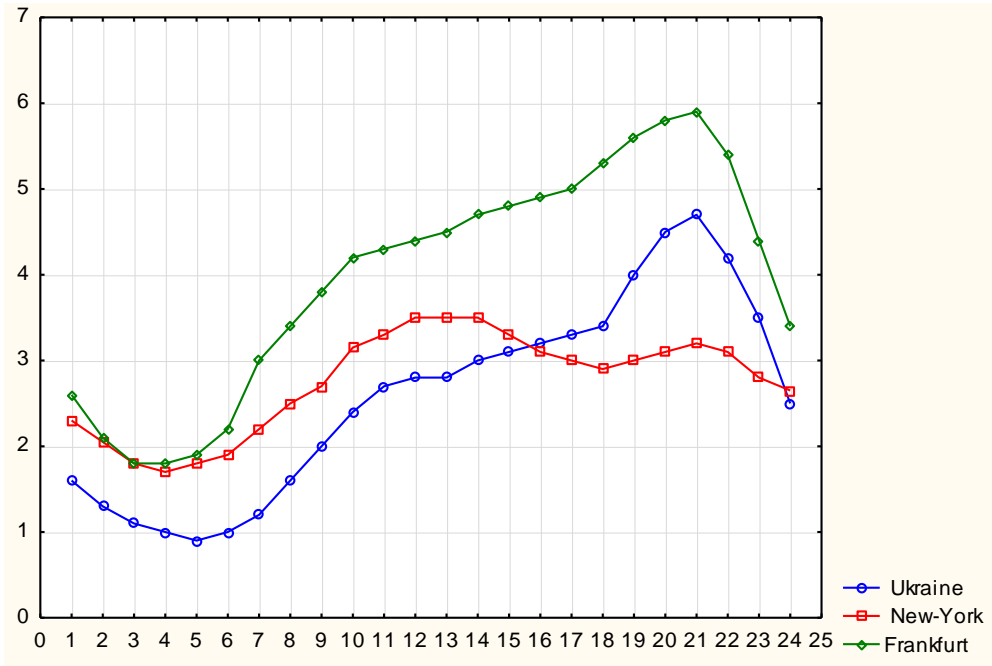


Рисунок 2.10 - Вихідні порівнювані графіки інтенсивності трафіку протягом доби

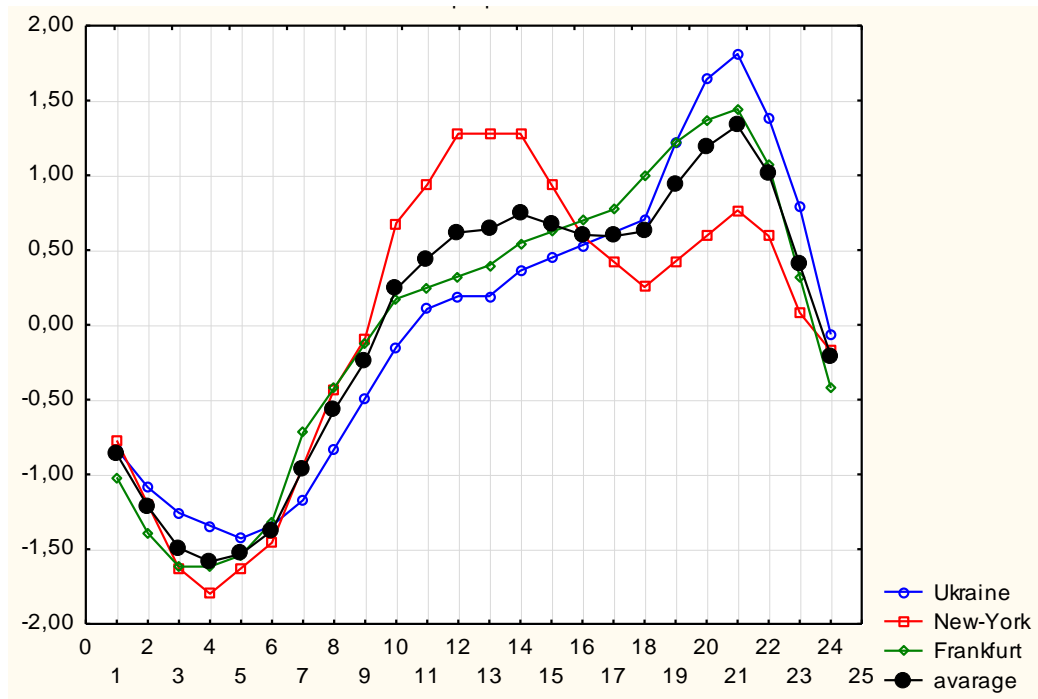


Рисунок 2.11 - Нормовані лінійні графіки інтенсивності трафіку та усереднений трафік протягом доби

Видно, що другий графік (дані по Нью-Йорку) дещо відрізняється. Для порівняння розподілу інтенсивності протягом доби застосуємо непараметричний критерій chi-square [106], роблячи три попарні порівняння:

(Україна – Франкфурт): chi-square = 2,019, df = 23, **p = 1,000**

(Україна – Нью-Йорк): chi-square = 17,300, df = 23, **p = 0,794**

(Нью-Йорк-Франкфурт): chi-square = 11,670, df = 23, **p = 0,975**.

У першому порівнянні дані гарно збігаються. Гіпотеза про випадковість розбіжності підтверджується (рівень значущості наближується до одиниці). У другому випадку розбіжності суттєві, помилка складає близько 21%. Але третє порівняння також дало значимий результат.

Таким чином, при певних припущеннях, можна зробити висновок, що тенденція зміни інтенсивності трафіку продовж доби статистично значима. Для прогнозування максимального навантаження і моделювання навантаження можна використовувати усереднений трафік, але середні значення обчислюються з певними вагами: графік даних по Нью-Йорку слід враховувати з меншою вагою, відповідно до значення отриманого ступеню довіри. Усереднений трафік (разом з вихідними) приведено на рисунку 2.11.

Так як за критерієм chi-square не одержано впевненої відповіді про випадковість розбіжностей відносно всіх трьох графіків, застосуємо інші процедури перевірки. Для попарного порівняння трьох графіків застосуємо критерій Манна-Уїтні для незалежних вибірок [107]. Результати порівняння приведено у таблицях 2.2 та 2.3. Вказані критерії є значущими на рівні  $p < 0,05$ .

Таблиця 2.2 - Результати критерію Манна-Уїтні для вибірок (Україна – Нью-Йорк)

	Sum rank gr 1	Sum rank gr 2	U	Z	p-value	Z - adjust.	p-value	N gr.1	N gr.2	2-sided exact p
Traf 1-2	584	592	284	-0,072	0,942	-0,072	0,942	24	24	<b>0,943</b>

Таблиця 2.3 - Результати критерію Манна-Уїтні для вибірок (Україна – Франкфурт)

	Sum rank gr 1	Sum rank gr 2	U	Z	p-value	Z - adjust.	p-value	N gr.1	N gr.2	2-sid. exact p
Traf 1-3	585	591	285	-0,05	0,958	-0,051	0,958	24	24	<b>0,959</b>

Результати порівняння вибірок (Нью-Йорк - Франкфурт) повністю співпадають з результатами у таблиці 2.3, тому що обраний критерій є ранговим, а обчислені ранги у вказаних групах співпадають, незважаючи на різні значення вихідних даних.

Як видно з результатів оцінок значущості критерію, всі порівняння підтверджують випадковість розходження у групах: у першому порівнянні помилка становить близько 5,6%, у двох інших біля 4%.

Тепер проведемо одночасне порівняння трьох вибірок за допомогою критерію Краскала-Уоліса (табл. 2.4).

Результати цього тесту повністю підтверджують гіпотезу про випадковість розбіжностей, значимість критерію близька до одиниці.

Таблиця 2.4 - Результати критерію Краскала-Уоліса для трьох вибірок

H ( 2, N= 72) = 0,008 p = <b>0,996</b>			
Cod	N	Sum Ranks	Mean Rank
1	24	869,0000	36,20833
2	24	877,0000	36,54167
3	24	882,0000	36,75000

Виходячи з усього вищезазначеного можна зробити висновок – структура веб-трафіку є подібною у всьому світі незалежно від географічного розташування комп'ютерної мережі та обсягів веб-трафіку. Таким чином його можна використовувати при побудові імітаційних моделей комп'ютерних

мереж у якості вхідних даних для досягнення адекватності моделі та точності прогнозу.

Наступним етапом дослідження є аналіз зміни трафіку впродовж місяця. Графік його зміни відповідно до рисунку 2.7. приведений на рисунку 2.12.

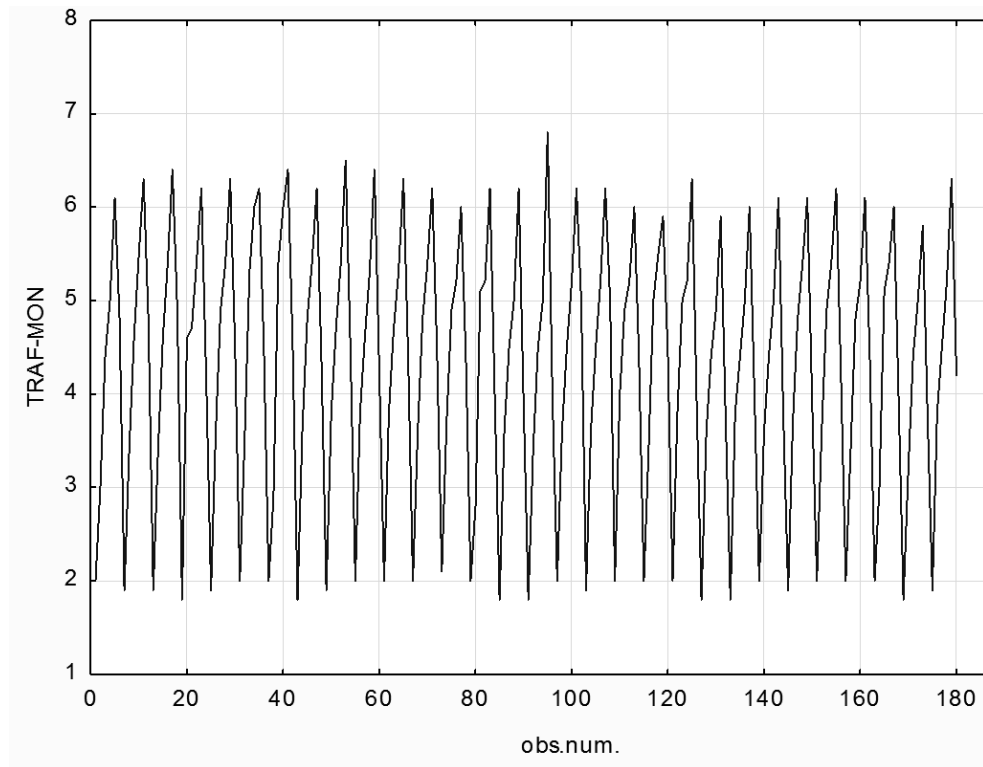


Рисунок 2.12 - Зміна інтенсивності трафіку впродовж місяця

Вихідні дані утворюють стаціонарний часовий ряд (при умові перетворень нормування значень до нормованих величин). Періодичність змін візуально не викликає сумнівів. Доведемо це за допомогою побудови моделі авторегресії з урахуванням сезонної компоненти (табл. 2.5). Було підібрано модель з трьома параметрами:  $q$  – параметр авторегресії,  $Ps(1)$  та  $Ps(2)$  – сезонні параметри авторегресії. Видно, що оцінки параметрів дуже точні (рівні значущості близькі до нуля). Таким чином, періодичність ряду з сезонним лагом, що становить 24 години підтверджується.

Таблиця 2.5 - Оцінка параметрів авторегресійної моделі даних за п'ять років

Model (1,0,0)(2,0,0) Seasonal lag: 24 MS Residual = 0,3041				
Param.		Asimpt. - Std.error	Asimpt. - t( 116)	p
p(1)	0,7932	0,0473	16,7417	<b>0,0000</b>
Ps(1)	0,7400	0,0753	9,8263	<b>0,0000</b>
Ps(2)	0,2361	0,0756	3,1202	<b>0,0021</b>

Випадковість помилок моделі підтверджується графіком залишків, який близький до нормального розподілу, що проілюстровано на нормальному ймовірнісному графіку (рис. 2.13).

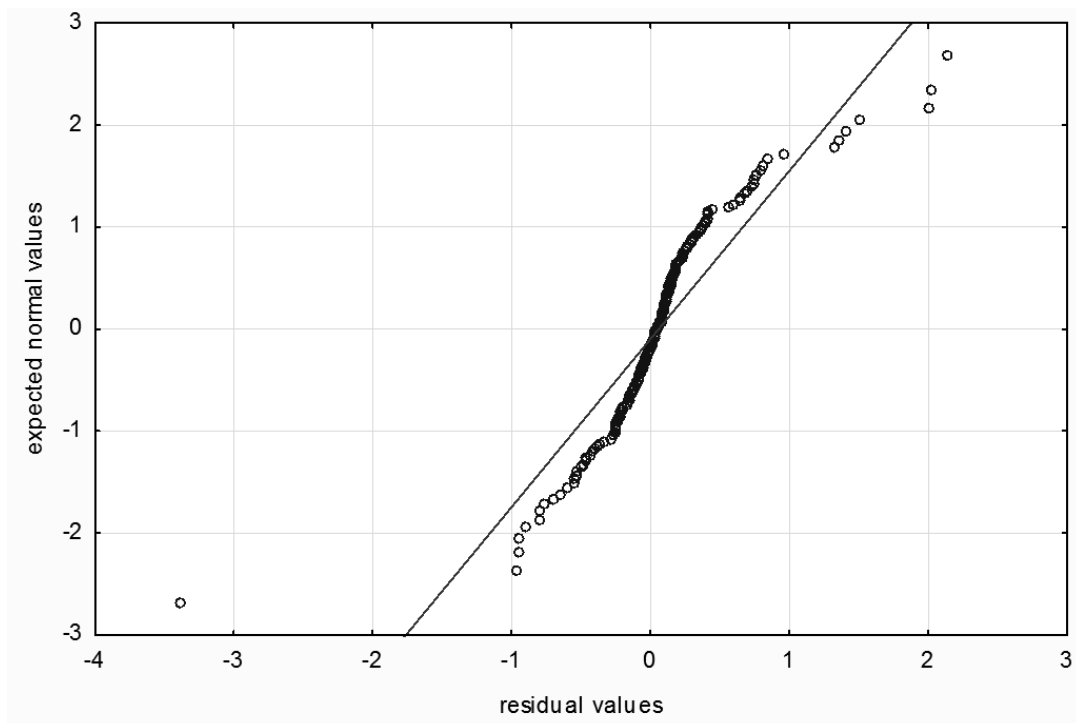


Рисунок 2.13 - Нормальний ймовірнісний графік розподілу залишків

Періодичність аналізованого часового ряду підтверджується також графіком авторегресійної функції.

Третім етапом дослідження є аналіз зміни трафіку впродовж року на основі даних, приведених на рисунку 2.5 (застосовувались дані про

максимальне навантаження). Лінійний графік даних, що утворює часовий ряд, представлений на рисунку 2.14.

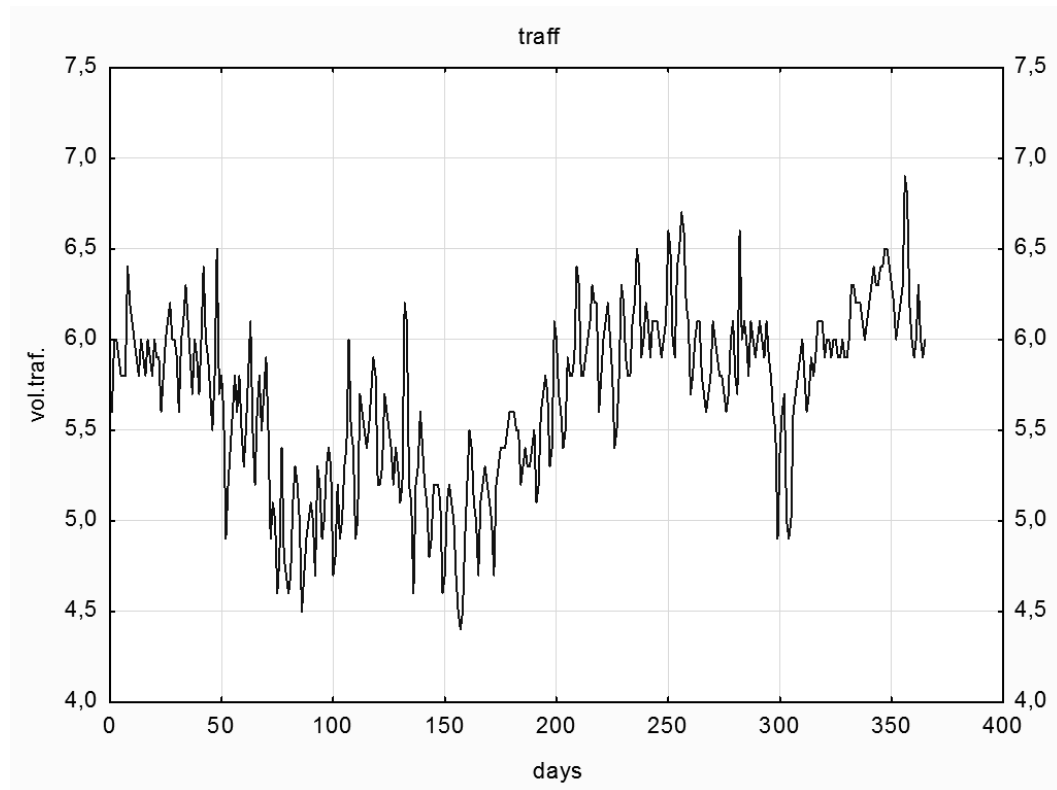


Рисунок 2.14 - Часовий ряд інтенсивності трафіку впродовж року

Видно, що ряд не є стаціонарним. Для його аналізу слід провести ряд значних перетворень. При застосуванні експоненційного згладжування ряду можна побачити тенденцію його зміни, в якій слід приділити увагу місяцям максимального навантаження. Можна зробити припущення, що є річна періодичність зміни трафіку. Її можна проаналізувати лише на основі даних за декілька років (див. рис. 2.9). Часовий ряд значень максимальних навантажень у мережі показано на рисунку 2.15.

Періодичність цього ряду на протязі року візуально виражена не чітко. Щоб перевірити його періодичність із застосуванням моделі автокореляції, треба зробити ряд стаціонарним. Для цього було застосовано перетворення зсуву на один лаг (рис. 2.16).

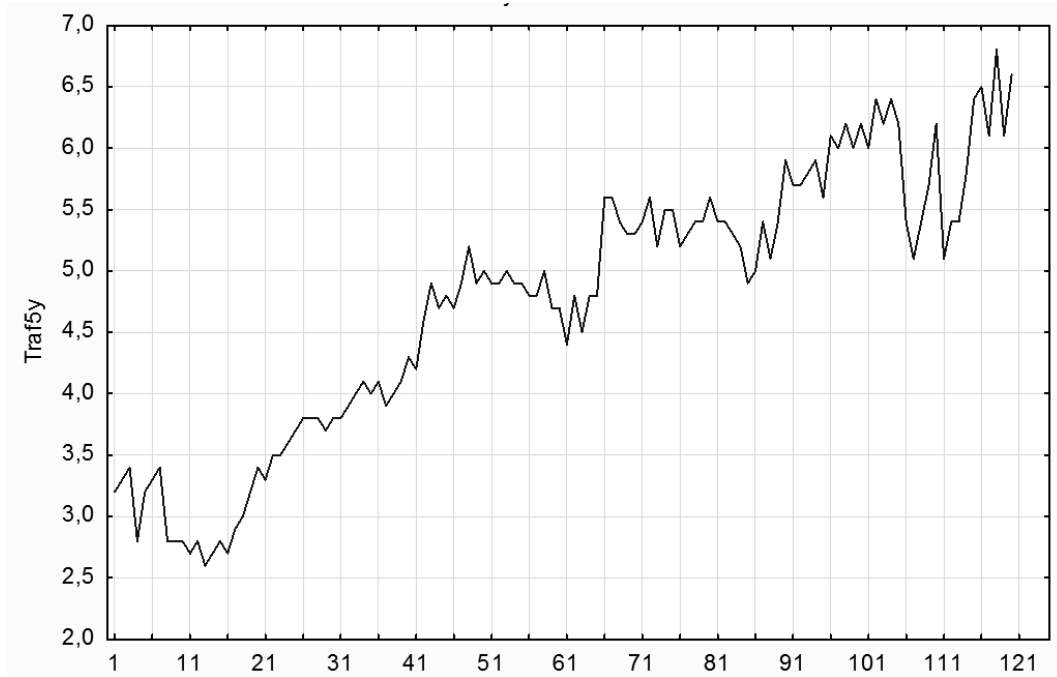


Рисунок 2.15 - Часовий ряд максимальних навантажень трафіку за п'ять років

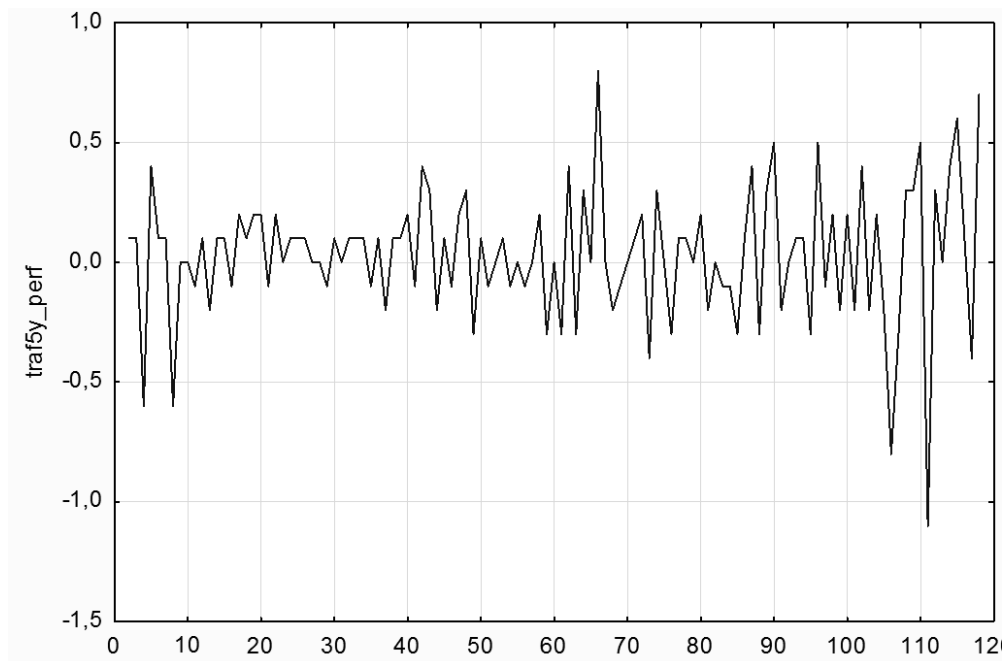


Рисунок 2.16 - Перетворений часовий ряд максимальних навантажень трафіку за п'ять років

Було підібрано модель авторегресії з трьома параметрами (табл. 2.6), тут додатково  $Qs$  - сезонний параметр ковзаючого середнього. Видно, що параметри оцінено доволі точно (рівні значущості близькі до нуля), функція

автокореляції (рис. 2.17) також підтверджує коректність моделі. Можна зробити висновок, що сезонна річна періодичність є значущою. Тобто є закономірність, що найменша завантаженість спостерігається в червні та серпні, а найвища – у лютому.

Таблиця 2.6 - Оцінка параметрів авторегресійної моделі даних за п'ять років

Transform.: D (1) Model (0,1,1) (1,0,1) Seasonal lag: 24 MS Residual = 0,0662				
Param.		Asimpt. - Std.error	Asimpt. - t( 116)	p
q(1)	0,4865	0,0906	5,366837E+00	<b>0,0000</b>
Ps(1)	0,9998	0,0000	2,734817E+19	<b>0,0000</b>
Qs(1)	0,6742	0,1017	6,623994E+00	<b>0,0000</b>

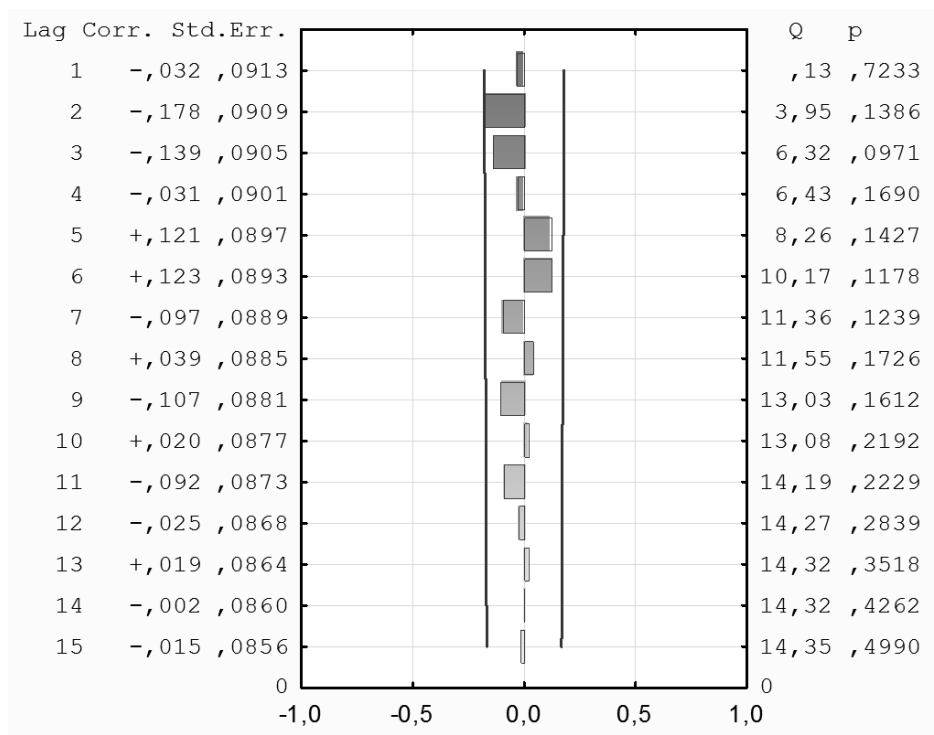


Рисунок 2.17 - Функція авторкореляції для моделі авторегресії



За цими ж даними можна дослідити тренд збільшення інтенсивності трафіку (рис. 2.18). Тренд було отримано згладжуванням за допомогою зваженого методу найменших квадратів.

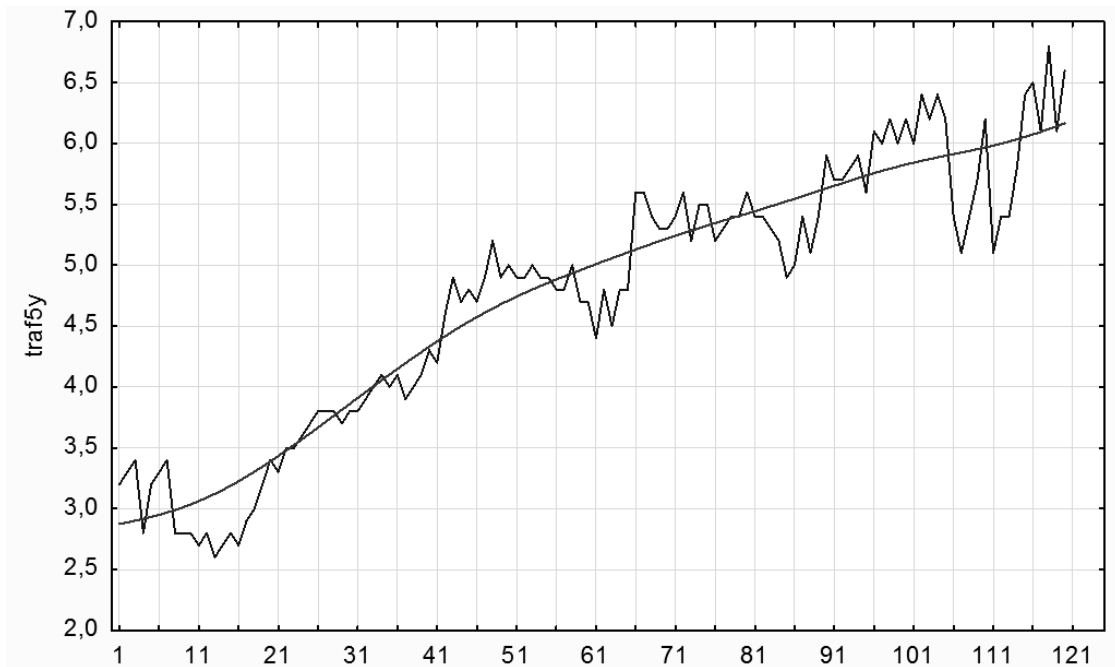


Рисунок 2.18 - Тренд збільшення трафіку за п'ять років

Отриманий тренд може бути використаний для прогнозування максимальних навантажень в мережі на майбутні роки. При цьому слід зробити припущення не брати до уваги різкі зміни у тренді, пов'язані з якісними змінами (наприклад, внаслідок вибуху нових технологій) у сфері телекомунікацій у майбутньому.

#### **2.4 Моделі стратегії злиття в дослідженні ефективності діяльності операторів зв'язку**

Інтеграція процесів злиття та поглинання є наслідком збільшенням обсягів ринку телекомунікаційних послуг в останні роки [108]. Тому вказані стратегії виступають засобом інтеграції ресурсів компанії, що сприяє

підвищенню конкурентоспроможності. В залежності від виду інтеграції (вертикальна чи горизонтальна) об'єднання операторів телекомунікацій надає змогу збільшити обсяги споживання, посилити диверсифікацію послуг. Крім того, виникає синергетичний ефект, під яким розуміється загальне зростання ефективності діяльності в результаті інтеграції [109].

Провідними операторами формується нова бізнес-модель, що використовує існуючі виробничі ресурси у розвинутих сегментах ринку чи здійснює їх розвиток через стратегії злиття та поглинання. Стратегія злиття використовується також при вирішенні проблеми управління трафіком та забезпечення доступу користувачів до інформаційних ресурсів.

Для прийняття рішення з інвестування у найбільш ефективні стратегії розвитку застосовується математична модель лінійного програмування, в якій максимізується узагальнена цільова функція:

$$F_{\max} = \sum_{i=1}^5 a_i x_i$$

де  $a_i$  – вагові коефіцієнти оцінок ефективності інвестицій;

$x_1$  – у нові сервіси та технології зв'язку;

$x_2$  – у технологічне переоснащення обладнання;

$x_3$  – в удосконалення операційної діяльності;

$x_4$  – у розвиток інноваційної інфраструктури;

$x_5$  – у менеджмент для виходу на нові ринки (розширення кола споживачів).

Ефективність інвестицій визначається як

$$x_i = \frac{y_i}{d_i},$$

де  $y_i$  – дохід від впровадження інвестицій,

$d_i$  – обсяг інвестицій.

Задача вирішується в умові обмежень на загальний обсяг інвестицій:

$$\sum_{i=1}^5 d_i \leq D$$

Для визначення вагових коефіцієнтів ефективності інвестицій застосовуються методи прогнозування на основі узагальнених показників розвитку галузі [110].

Розглянемо завдання оцінювання ефективності розвитку в напрямку розширення кількості споживачів послуг. Слід зазначити відсутність лінійної залежності фінансових показників (дохід операторів) ринку від кількості споживачів [111]. Так, у спрощеному вигляді середній дохід від абонента визначається за формулою

$$Y = N \times S,$$

де  $N$  - обсяг споживання послуг (кількість споживачів),

$S$  – вартість послуг.

Таким чином, при збільшенні кількості споживачів дохід має пропорційно збільшуватись. Але в умовах цінової конкуренції має тенденція суттєвого зменшення вартості послуг, що у свою чергу вповільнює зріст доходів. В якості прикладу на рисунку 2.19 приведено прибуток відділу Vodafone у Німеччині [112]. На рисунку відображено падіння доходів на 16% до 2013 року, потім ріст доходів на 22%. Якщо пов'язати ці дані з тенденцією постійного зростання трафіку, можна зміну доходів пояснити загальним зниженням ціни на передавання інформації і водночас стрімким зростанням обсягу трафіку після 2014 року.

При дослідженні ефективності інвестицій у сфері телекомунікацій треба враховувати синергетичний ефект, який пов'язаний з розміром мережі оператора та кількістю абонентів.

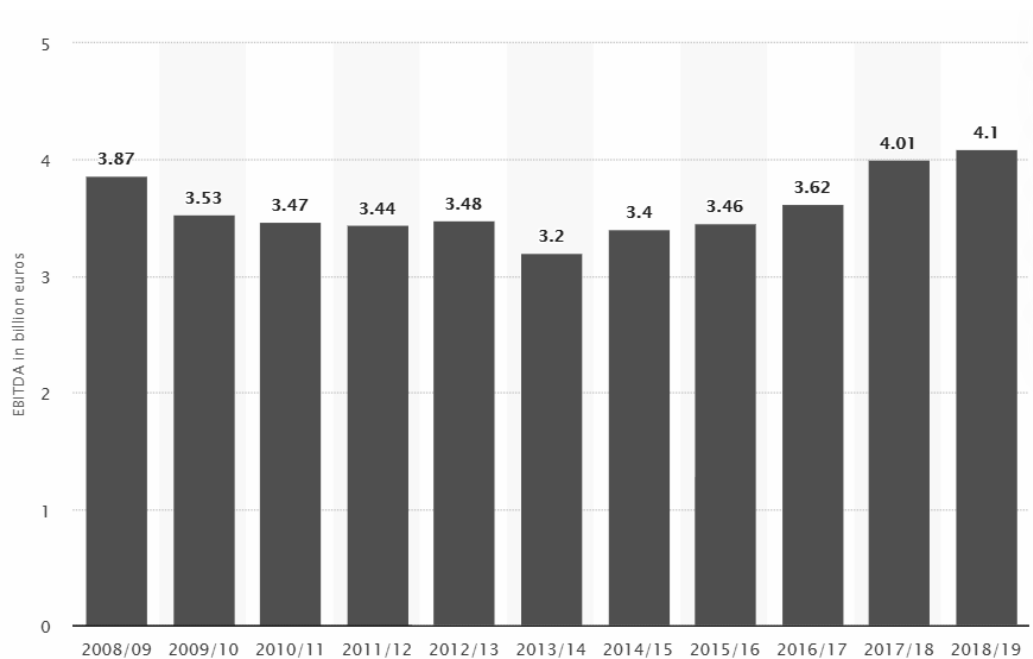


Рисунок 2.19 - Тенденція зміни прибутку оператора зв'язку

При зростанні кількості споживачів виникають наступні ефекти:

- комунікативний, який означає ефективний обмін інформацією та розвиток мережі контактів;
- інформаційний, який підвищує цінність мережі в умовах поширення та агрегації контенту;
- брендовий, який підвищує лояльність споживачів.

Таким чином можна виділити наступні фактори, які впливають на обсяг продажів послуг компанії (що веде до підвищення її ефективності) та у свою чергу пов'язані між собою:

а) фактори, які напряду підлягають управлінню:

- масштаб мережі,
- операційна діяльність,
- фінансові інвестиції,
- рівень менеджменту;

б) фактори другого порядку управління (які залежать від факторів групи а))):

- кількість користувачів,
- лояльність клієнтів.

Щоб дослідити мережевий ефект взаємодії вказаних факторів [113], слід побудувати причинно-наслідкову діаграму з відповідними коефіцієнтами впливу (взаємодії факторів) (рис. 2.20).

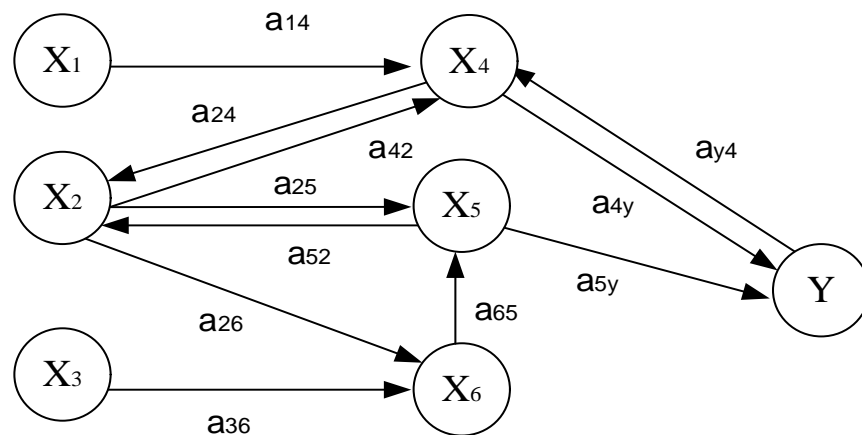


Рисунок 2.20 - Причинно-наслідкова діаграма взаємовпливу факторів обсягу продажів послуг компанії

На рисунку позначено: досліджувана змінна  $Y$  – обсяг продажів, та множина факторів  $X_1$  - операційна діяльність,  $X_2$  - фінансові інвестиції,  $X_3$  - рівень менеджменту,  $X_4$  - масштаб мережі  $X_5$  - кількість користувачів,  $X_6$  - лояльність клієнтів; коефіцієнти впливу -  $a_{ij}$  та  $a_{iy}$ ,  $i, j = \overline{1,6}$ . Слід відзначити, що між деякими елементами є взаємовплив, а на діаграмі є три петлі, що викликає відповідний ефект саморозвитку.

Так, наприклад, фактор збільшення обсягу продажів виявляється при реалізації послуг більшій абонентській базі (ефект критичної маси) через єдині канали розподілу. Тут також працює закон Меткафа, за яким цінність мережі зростає нелінійно (відповідно квадрату кількості додаткових споживачів). Розширення ринку споживачів у свою чергу викликає зниження витрат на

послуги зв'язку. Результат об'єднання операторів сприяє збільшенню прибутку за рахунок використання єдиної інфраструктури та підвищення лояльності споживачів.

Розглянемо економічний прояв синергетичного ефекту компаній при реалізації стратегії злиття. Сумарний дохід обох компаній до об'єднання визначається як

$$Y_0 = N_1 S_1 + N_2 S_2 ,$$

де  $N_1, N_2$  – відповідні обсяги наданих послуг для споживачів,

$S_1, S_2$  – вартість послуг двох операторів.

Внаслідок об'єднання компаній сумарний дохід можна представити у вигляді:

$$Y_0 = Y_S + N_1 S_1 + N_2 S_2 ,$$

де  $Y_S$  – ефект синергії від консолідації.

Вплив мережного ефекту в сфері телекомунікацій також нелінійний, його можна виразити експоненційною функцією. Таким чином навіть при зниженні ціни після консолідації операторів, дохід може виявитися більшим за рахунок виграшу в розширенні мережі, оскільки генерується більшим обсягом її ресурсів. Мережний ефект при об'єднанні операторів можна відобразити за допомогою індексу  $\beta$ :

$$Y_0 = Y_S + \beta(N_1 S_1 + N_2 S_2).$$

Розглянемо варіанти значень цього індексу: якщо  $\beta = 1$ , то зростання цінності від об'єднання мережі не відбулось та обсяг наданих послуг незмінний;  $\beta > 1$  – відчувається синергетичний ефект;  $\beta < 1$  – зростає тільки кількість споживачів.

## 2.5 Висновки до розділу

Розглянуто основні параметри якості телекомунікаційних послуг, які відображають можливість і ефективність транспортування інформації в комп'ютерній мережі. Проаналізовано напрямки стратегічного управління конкурентоспроможністю телекомунікаційних послуг оператора зв'язку. Зроблено висновок, що відповідно до вимог абонентів щодо якості телекомунікаційних послуг здійснюється формування структури мережі, вибір транспортних протоколів, апаратного та програмного забезпечення. Таким чином для надання якісних телекомунікаційних послуг треба гарантувати високу пропускну здатність, швидкий час реакції мережі та інші параметри. В результаті запропоновано метод прийняття рішень з формування складу телекомунікаційних послуг.

Розглянуто та формалізовано основні характеристики ефективності комп'ютерної мережі. Для спрощення моделювання, а також для більшої універсальності описаного методу, характеристики були узагальнені або агреговані в абстрактні показники роботи комп'ютерної мережі.

В результаті дослідження міжнародного трафіку на схожість та самоподібність за допомогою трьох статистичних критеріїв доведено добову періодичність протягом певного часу, також підтверджено гіпотезу про незалежність мережевої динаміки від конкретного місцезнаходження комп'ютерної мережі та її розміру. Шляхом побудови авторегресійної моделі часового ряду за даними спостережень впродовж місяця доведена періодичність ряду з сезонним лагом, що становить 24 години. Сезонна річна періодичність інтенсивності трафіку також доведена на основі авторегресійної моделі з трьома параметрами. На основі даних п'ятирічних спостережень було отримано тренд зростання обсягів трафіку, який може бути використаний для прогнозування максимальних навантажень в мережі на майбутні роки.

Розглянуто стратегії розвитку сучасних операторів зв'язку, що викликані зростаючими обсягами та неоднорідністю трафіку комп'ютерних мереж.

Зроблено висновок про тенденцію застосування стратегії злиття декількох операторів, розглянуто її переваги. Розроблено модель синергетичного мережевого ефекту в умовах об'єднання операторів. Модель дозволяє оцінити вплив зміни кількісних параметрів мережі на зміну показників її економічної ефективності.

В результаті отримано науковий результат: удосконалено метод прийняття рішень з управління процесами надання телекомунікаційних послуг, шляхом прогнозування обсягу вхідного потоку та моделювання структури комп'ютерної мережі.

Результати даного розділу опубліковано в роботах [6 – 8, 14].



## РОЗДІЛ 3

### МОДЕЛЮВАННЯ ТОПОЛОГІЇ ТА ПАРАМЕТРІВ КОМП'ЮТЕРНИХ МЕРЕЖ У ДИНАМІЧНОМУ СЕРЕДОВИЩІ

#### **3.1 Формування потенційно ймовірних топологій комп'ютерних мереж**

Для того щоб можна було обґрунтовано вказати на оптимальність топології, яка будується, варто виділити загальні критерії оптимальності. За головні критерії обираються вартість мережі, яка модернізується, а також технічні параметри, що характеризують стабільність її роботи та є важливими показниками якості надання послуг. Під *стабільністю* мається на увазі відсутність помилок при передачі, а також підтримка заявленої абоненту пропускної здатності мережі [114].

Розглянемо види топологій комп'ютерних мереж, які найчастіше застосовуються:

- однорідний граф,
- граф Керні,
- дувалентний граф,
- граф-дерево.

Опишемо ці топології з урахуванням вказаних вище критеріїв:

- повнозв'язний однорідний граф (рис. 3.1) – є рішенням, яке надає найбільшу стабільність зв'язку та швидкість обміну даними, та найменшу ймовірність перевантажень. Але така мережа може бути структурно надлишковою - її реалізація потребує залучення значних коштів та ресурсів, що не будуть використовуватися у повному обсязі.

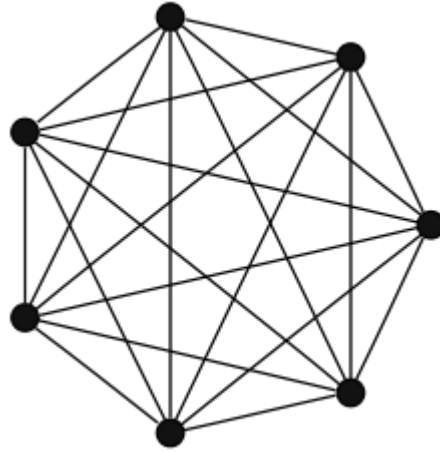


Рисунок 3.1 - Однорідний граф:

1 – точки відображають вузли, тобто комутатори та маршрутизатори КМ;

2 – ребра - дровові канали зв'язку КМ

- граф Керні (рис. 3.2) – є менш коштовним с точки зору використання ресурсів, оскільки надлишкові ребра не будуть побудовані; надлишкові ребра - це ті, що перетинають інші. Але згідно думки спеціалістів [115] виявляється, що наскільки великою не була б «валентність» мережі, часто для передачі даних використовується не більше двох маршрутів. Тому і граф Керні не є оптимальним з економічної точки зору на її побудови, тобто потребує подальшої оптимізації;

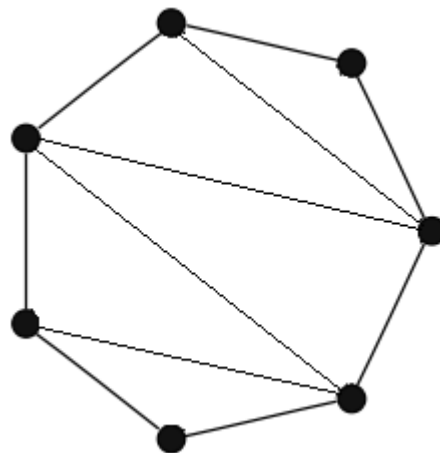


Рисунок 3.2 - Максимально насичений граф Керні

- дувалентний граф (рис. 3.3) – є майже однорідним графом з точки зору стабільності роботи відповідної структури, але максимально використовує ресурси побудованої мережі. Це відбувається за причини значної утилізації пропускної здатності каналів зв'язку за рахунок оптимізації алгоритмів передачі даних на рівні протоколів.

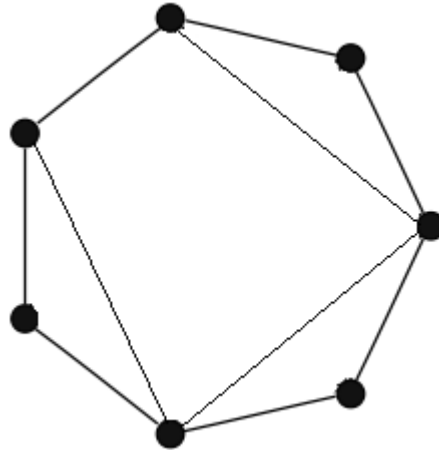


Рисунок 3.3 - Дувалентний граф з валентністю 3,4

- граф-дерево (рис. 3.4) – є найбільш дешевим рішенням при побудові комп'ютерних мереж, але у такій топології деякі вузли використовуються набагато частіше інших. Це призводить до перевантажень та помилок при передачі даних. Така мережа не може вважатися стабільною, тому вказана топологія майже не використовується у регіональних та глобальних телекомунікаційних мережах, а застосовується тільки у корпоративних мережах підприємств.

Таким чином, дувалентний граф, є найбільш оптимальною структурою з з урахуванням двох критеріїв.

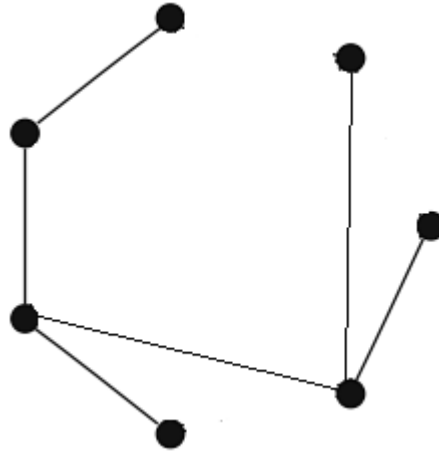


Рисунок 3.4 - Граф-дерево

### 3.2 Метод модернізації топології комп'ютерної мережі у квазіоднорідну структуру

На основі інформації з відкритих джерел та статей [116] можна сформулювати власний погляд на методи контролю якості надання послуг комп'ютерними мережами, на основні задачі керування трафіком та на різноманітні підходи до формування системи керування трафіком, які б могли самоорганізуватися та підтримувати свій стабільний стан, використовуючи методи протидії мережевим загрозам та

Для подальшого спрощення варто представити комп'ютерну мережу у вигляді плоского графу, щоб мати змогу застосувати до неї методи системного аналізу.

На сьогоднішній день вже була запропонована методика побудови максимально плоского графу та його оптимізації [117, 118]. Ця методика буде використана у подальшому для створення плоского графу в розроблюваному методі.

Метод складається з трьох послідовних етапів модифікації топології комп'ютерної мережі. Передбачається, що користувачем задані усі вершини

(вузли/пристрої комутації) та ребра (канали передачі даних, у структурі комп'ютерної мережі маються на увазі дротові канали), які створюють граф, який вже не має бути змінений у процесі роботи алгоритму. Вказані ресурси вже є наявними і для економії не мають бути видалені з топології, а мають бути враховані при побудові нової. Розглянемо ці етапи:

*1. Побудова гранично плоского графу.*

Для оптимізації мережі спочатку потрібно наситити вже наявний граф новими ребрами, які б не пересікали одне одного. Для цього алгоритм потребує графу  $K$ , який містить наявну топологію з усіма вершинами графу, їх координати, та таблицю суміжності, яка позначає зв'язки між вершинами (табл. 3.1). Кількість вузлів позначимо  $n$ , ребер –  $v$ .

Таблиця 3.1 - Матриця пропускних здатностей

	Router1	Route2	Router3
Router1	-	100Mb/s	1000Mb/s
Router2	100Mb/s	-	
Router3	100Mb/s		-

Алгоритм передбачає перебір усіх вершин, починаючи з першої та перевірку можливості додання нового ребра, яке буде задовольняти наступній умові: нове ребро не може перетинати вже існуючі. Після того як перевірена перша вершина та були додані усі можливі ребра, алгоритм розглядає наступну вершину. Але тепер з розглядання виключається зв'язок першої вершини з другою, та розгляд починається одразу з третьої вершини. Так алгоритм відпрацьовує до поки не розгляне вершину з індексом  $n$ , та усі можливі ребра не будуть додані.

У результаті маємо наступні вихідні дані: граф  $G$  – отримана топологія максимально насичена ребрами, які не перетинають одне одного.

## 2. Оптимізація гранично плоского графу.

Для того щоб оптимізувати гранично насичений граф, ребра якого не перетинаються одне з одним, застосовується наступний алгоритм.

Вхідними даними є отриманий на попередньому етапі граф  $G$ , який має два типи ребер:

- відмічені (усі ребра з графу  $K$ ) – які не можна змінювати;
- невідмічені (ребра додані на попередньому етапі) – за рахунок яких буде виконуватися оптимізація.

Алгоритм послідовно розглядає усі ребра графу  $G$ , починаючи з першого. Позначимо  $v_1$  та  $v_2$  вузли ребра  $v_1v_2$ , у такому випадку алгоритм шукає вузли, які б мали спільне ребро з  $v_1$ , або з  $v_2$ . Коли знайдено щонайменше два таких вузли  $v_3$  та  $v_4$ , виконується перевірка чи є нове ребро  $v_3v_4$  коротшим за  $v_1v_2$ , у випадку якщо так і є, та ребро  $v_1v_2$  не є відміченим, ребро  $v_1v_2$  видаляється, а замість нього створюється ребро  $v_3v_4$ . Цей процес повторюється до поки в графі  $G$  не буде неоптимальних ребер.

У результаті роботи алгоритму ми отримаємо граф  $O$  – який є максимально насиченим ребрами, ребра якого не перетинаються одне з одним, та є найкоротшими.

## 3. Приведення топології комп'ютерної мережі до максимально дувалентної.

Для виконання цього етапу можна застосувати один з трьох алгоритмів:

- оптимізація по кількості зв'язків;
- оптимізація по вартості ребер;
- оптимізація у довільному порядку з використанням стохастичних алгоритмів (наприклад, метод Монте-Карло).

Кожен з цих алгоритмів у якості вхідних даних використовує граф  $O$ , а також обрані максимальні «валентності» комп'ютерної мережі ( $p(2,3)$  або  $p(3,4)$ ):

1. Алгоритм оптимізації по кількості зв'язків сортує усі вершини за кількістю ребер, які поєднані з вказаною вершиною, та видаляє ребра у цієї вершини у випадку, якщо вони не є відміченими, а також, якщо валентність вершини є більшою ніж задана. Після чого алгоритм переходить до наступної вершини і так до тих пір, поки в графі не залишиться вершин, які не задовільняють умові максимальної кількості валентностей. Варто зазначити, що ребра з одного вузла видаляються випадковим чином, незважаючи на їх вагу.

2. Алгоритм оптимізації по вартості ребер сортує усі ребра графу  $O$  за їх вартостями, та починає розглядання з найбільш вагомого (тобто найменш оптимального) ребра. Якщо ребро не є відміченим, а також його вершини мають валентність більшу за зазначену користувачем, ребро видаляється. Алгоритм виконується до тих пір, поки в графі не залишиться вершин, які не задовільняють умові максимальної кількості валентностей.

3. Алгоритм оптимізації у довільному порядку базується на двох попередніх алгоритмах, але сортує ребра та вершини у довільному порядку, на основі стохастичного алгоритму.

Запропоновані алгоритми у сукупності являють собою метод побудови первинної структури комп'ютерної мережі. Проаналізувавши таку мережу, стає можливим побудувати найбільш ефективну структуру комп'ютерної мережі без залучення надлишкових ресурсів, та зі збереженням параметрів стабільності роботи мережі.

Нижче наведені приклади з модернізації мережі. На рисунку 3.5 відображена схема тестової мережі, яка буде модернізована.

Рисунок 3.6 відображає якою буде мережа після етапу максимального насичення, перед її оптимізацією.

Рисунок 3.7 відображає остаточну модель нової мережі.

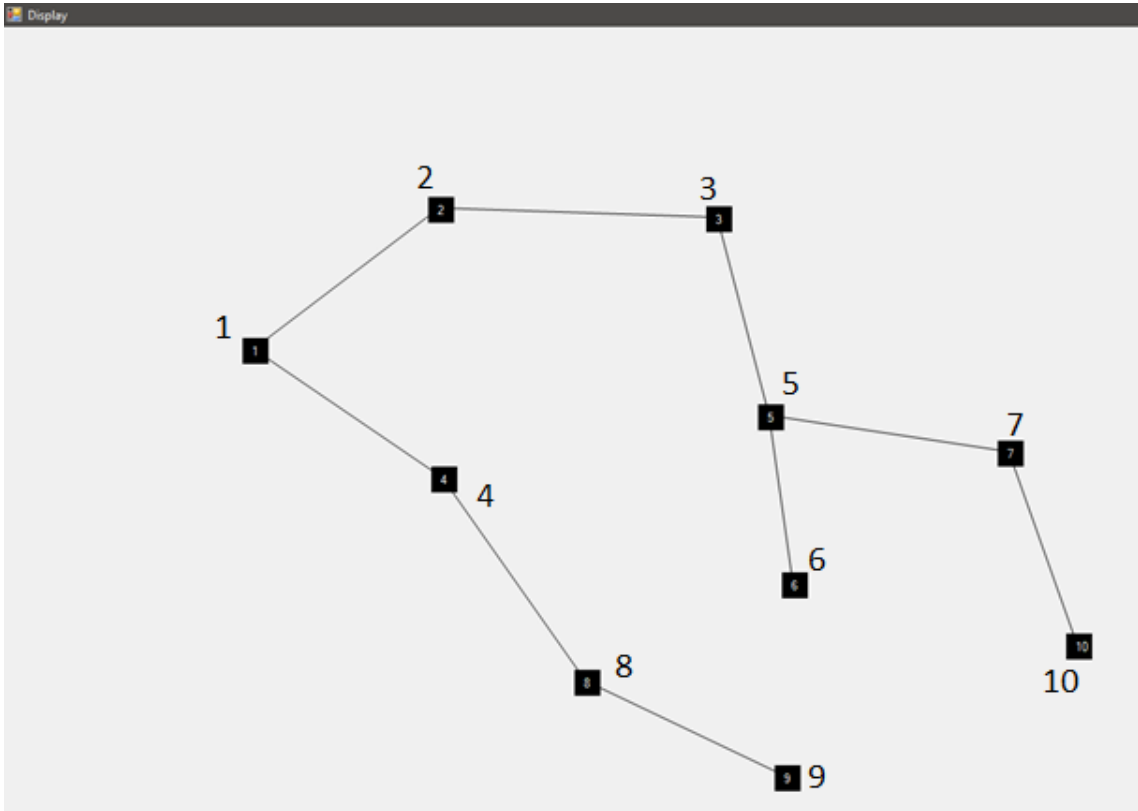


Рисунок 3.5 - Форма для графічного відображення мережі. Стартова мережа

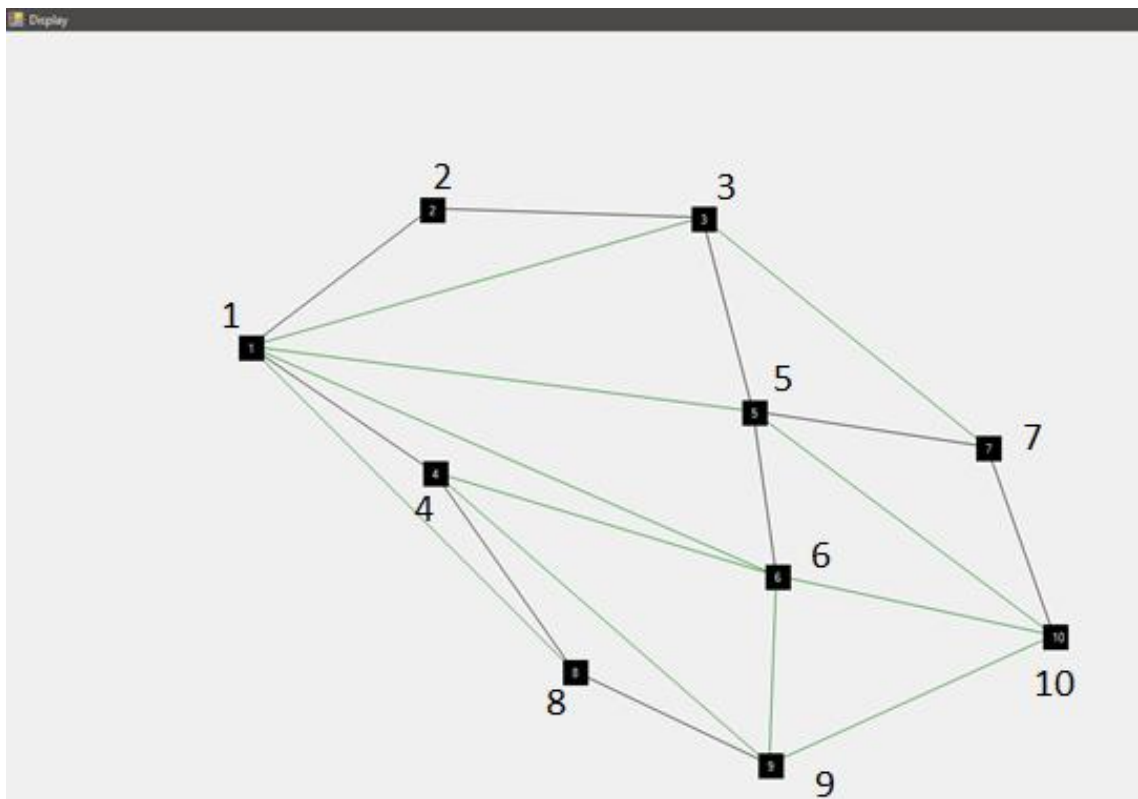


Рисунок 3.6 - Форма для графічного відображення мережі. Насичена мережа



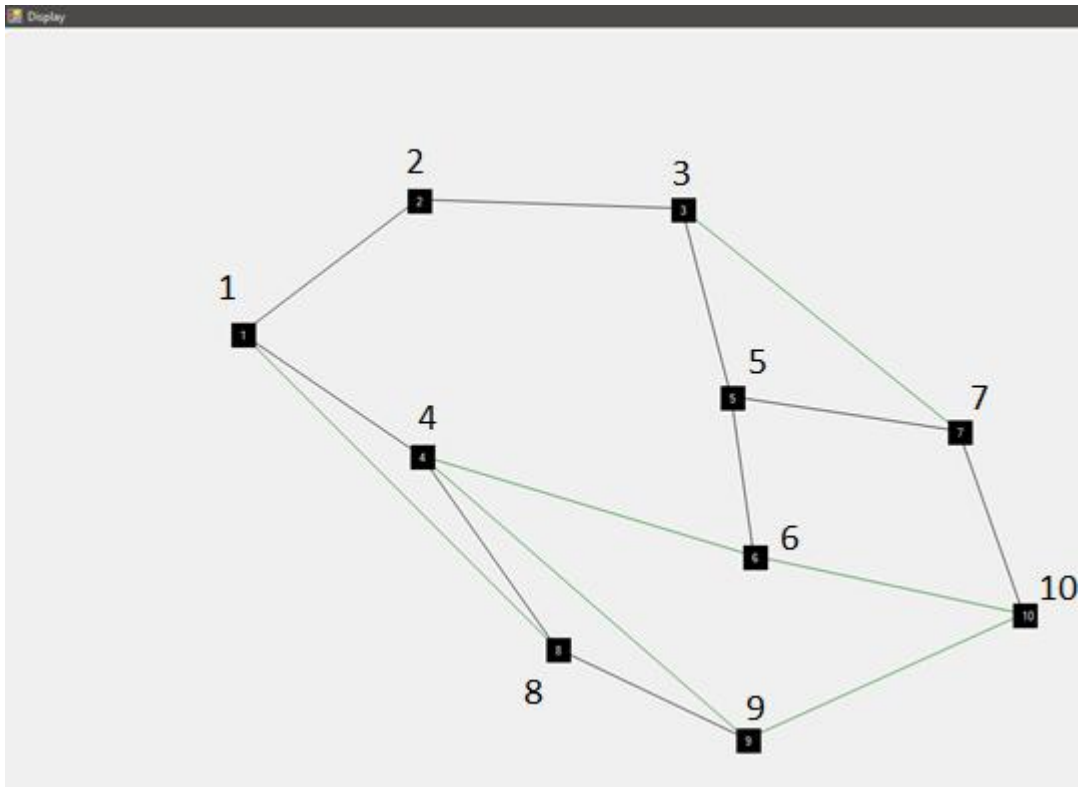


Рисунок 3.7 - Форма для графічного відображення мережі. Оптимізована мережа

### 3.3 Характеристики комп'ютерної мережі нижніх рівнів моделі OSI

Як вже зазначалося в розділі 2, коли мова йде про забезпечення показників якості телекомунікаційних послуг, важливо враховувати наступні характеристики комп'ютерної мережі, а саме:

- пропускна здатність каналів зв'язку;
- затримки при передачі даних;
- якість обслуговування;
- обсяг помилок під час передачі;
- вартість побудови каналів зв'язку;
- вартість вузлів мережі.

Особливо варто вказати, що важливо враховувати топологію мережі, а також якість та тип вузлів зв'язку. Під вузлами мережі тут маються на увазі маршрутизатори. Промисловим маршрутизаторам притаманні наступні технічні характеристики:

- стандарт передачі: 3G, 4G(LTE), тощо;
- швидкість завантаження з мережі;
- швидкість завантаження у мережу;
- кількість портів підключення;
- наявність бездротового з'єднання;
- наявність Firewall;
- наявність VPN [119].

Також у бізнес перспективі маршрутизатори мають ряд фізичних характеристик, які не впливають процес передачі даних, але значно впливають на вартість певного пристрою. Фізичні характеристики враховуються такі:

- робоча температура пристрою;
- захищеність пристрою від фізичного впливу;
- розмір пристрою.

Все це важливо враховувати при обранні того чи іншого пристрою зв'язку. Для оператора телекомунікаційних послуг питання вибору пристроїв маршрутизації та комутації є найбільш складним і важливим. Оскільки недостатньо обрати «найкращі» із можливих варіантів, варто обирати оптимальні варіанти. Завдяки цьому можна використовувати обладнання із максимальним прибутком і мінімізувати витрати на його придбання та супровід.

Як було стверджено попередньо, комп'ютерна мережа не є самостійною системою, оскільки працює з потоком вхідних даних – вимог на передачу даних. Тому обсяги даних, які мають передаватися на протязі певного часу, та у конкретний момент часу є невід'ємними характеристиками комп'ютерної мережі. Для подальшого розгляду можемо стверджувати, що:

- потік вхідних даних є статистично передбачуваним;
- його періодичність може бути доведена на протязі певного проміжку часу;
- його структура не є унікальною та певний тренд зберігається, незважаючи на географічне розташування користувачів;
- використання потоку вхідних даних дозволяє будувати імітаційні моделі поведінки транспортної мережі [120].

Узагальнена структура характеристик асоційованих з певними рівнями моделі OSI зображена на рисунку 3.8.

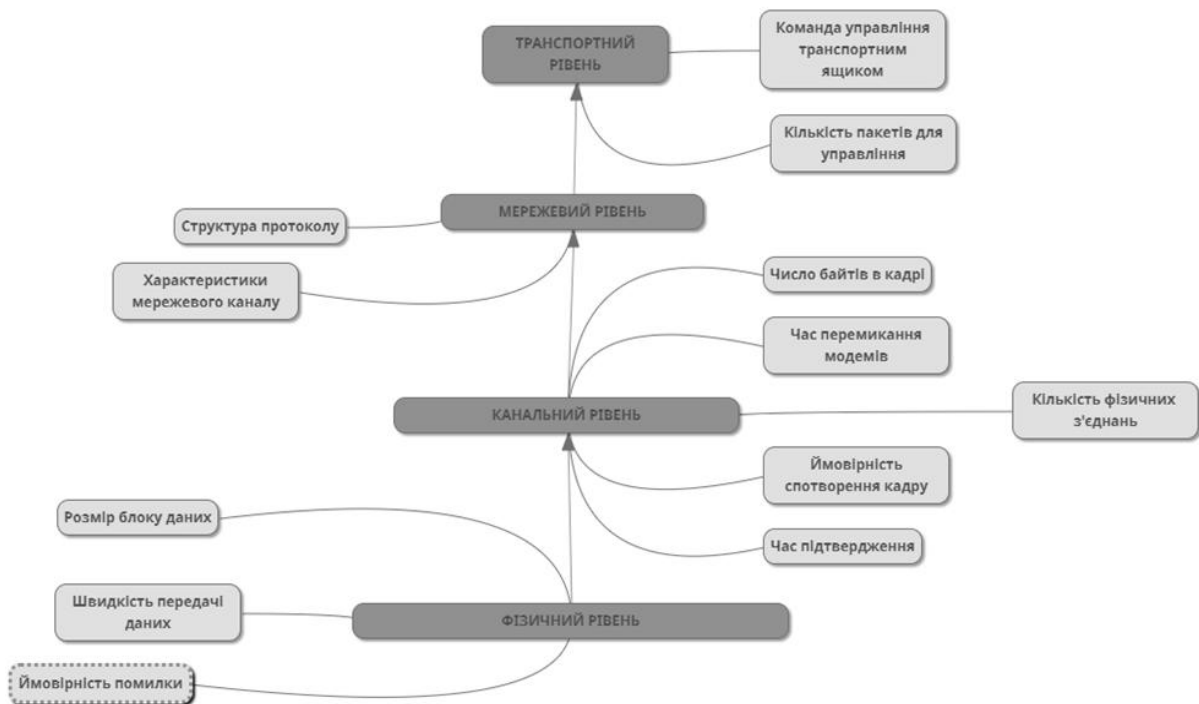


Рисунок 3.8 - Характеристики нижніх рівнів моделі OSI

Однак всі ці характеристиками є специфічними та ускладнюють процес моделювання. Для спрощення моделі було прийняте рішення використовувати абстракції з цих характеристик, які агрегують декілька властивостей одразу, або навіть ігнорують деякі з них. Нижче будуть наведені узагальнені характеристики транспортної мережі, які будуть використовуватися для моделювання.

1. Пропускна здатність (Bandwidth) – є найважливішою характеристикою каналу, однак вона ніяк не характеризує інші компоненти мережі. Сама по собі пропускна здатність не підходить для моделювання мережевої поведінки, оскільки не використовується в такому вигляді для надання послуг кінцевим споживачам. Для оцінки швидкості з'єднання зазвичай використовується термін потужність каналу (Channel Capacity) [121].

2. Потужність каналу є теоретично максимальним бітрейтом для передачі даних каналом зв'язку. Через помилки під час передачі даних, використовуючи максимальну потужність каналу було введено поняття Шенонівська потужність каналу (Shannon's channel capacity) - теоретично максимальній бітрейт для передачі даних каналом зв'язку без суттєвих помилок. Незважаючи на те, що фактично Шенонівська потужність каналу може бути перевищена, це, зазвичай, призводить до більших втрат і не варто підвищення швидкості передачі, це явище також відомо, як Шенонівський закон.

Потужність каналу ( $C$ ) буде надалі визначатися за допомогою формули:

$$C = B \log_2 (1 + SNR) ,$$

де  $B$  – пропускна здатність каналу,

$SNR$  (signal noise ratio) - відношення сигналу до шуму (чим більша ця характеристика, тим менше шум впливає на характеристики каналу).

Оскільки потужність каналу прямо пропорційна пропускній здатності, її часто називають цифрою пропускна здатність. Надалі під пропускною здатністю матиметься на увазі Шенонівська потужність каналу.

3. Затримка при передачі даних (latency) – це показник зниження якості обслуговування. Затримки виникають у випадку, якщо відбувається спроба передати каналом зв'язку кількість даних більшу за його пропускну здатність. Занадто велика затримка викликає перевантаження мережі, що в свою чергу призводить до втрати пакетів або навіть блокування з'єднання. У праці [122] зазначено, що затримка може бути вирахована використовуючи показники

пропускної здатності та об'єму вимог на передачу вказаним каналом. Затримка на каналі  $c$  визначена наступною формулою:

$$d_c = \frac{1}{B_c - df_c} , \quad (3.1)$$

де  $B_c$  – пропускна здатність каналу  $c$ ;

$df_c$  – потік вхідних даних на каналі  $c$ .

4. Якість обслуговування (quality of service) - це певне погодження щодо надання послуг передачі даних у мережі. Також під цим терміном можна розуміти ймовірність надходження пакету даних між двома вузлами мережі. Зазвичай якість обслуговування залежить від: пропускної здатності, затримки, джиттеру та втрати пакетів. Найбільше від якості обслуговування залежать такі мережеві сервіси, як:

- потокові мультимедійні програми;
- VoIP телефонія;
- видалене керування;
- та інші.

5. Обсяг помилок під час передачі – це узагальнений параметр, який агрегує у собі усі види помилок, які виникають при передачі даних, наприклад, втрата пакетів, пошкодження даних (data corruption), тощо.

### **3.4 Метод оцінювання параметрів комп'ютерної мережі на основі моделювання її структури**

Враховуючи специфіку об'єкта дослідження, а саме - транспортної мережі зв'язку, було прийняте рішення скористуватися імітаційним моделюванням, оскільки така модель у подальшому може бути описана у вигляді алгоритмів та використана для експериментів із застосуванням інформаційної технології моделювання .

Для спрощення моделі було прийняте рішення використовувати лише чотири нижні рівні моделі OSI. Це [123].

Наведемо функціональні особливості цих рівнів:

- фізичний рівень та канальний - відповідають за інструментальні засоби, які використовуються в мережі: мережеві адаптери, комутатори, репітери, оптоволокно, коаксіальні кабелі тощо, а також за їх розташування у структурі мережі - топологію;
- мережевий рівень - виконує побудову маршрутів передачі даних від відправника до отримувача, пошук найліпших маршрутів та перевантажень у мережі;
- транспортний рівень - відповідає за розподіл обсягів трафіку, який буде переданий за різними маршрутами, опираючись на ту інформацію, яку можна отримати з мережевого рівня.

Для представлення вхідних даних для моделі було використано дані вхідного трафіку на протязі деякого часу (години/дні/тижні). Приклад таких даних приведений на рисунку 3.9.

Зазначений вище розподіл функцій моделі дозволить спростити уявлення про реальну мережу та провести симуляцію її роботи. Тепер більш детально розглянемо кожен із цих рівнів функціонування моделі.

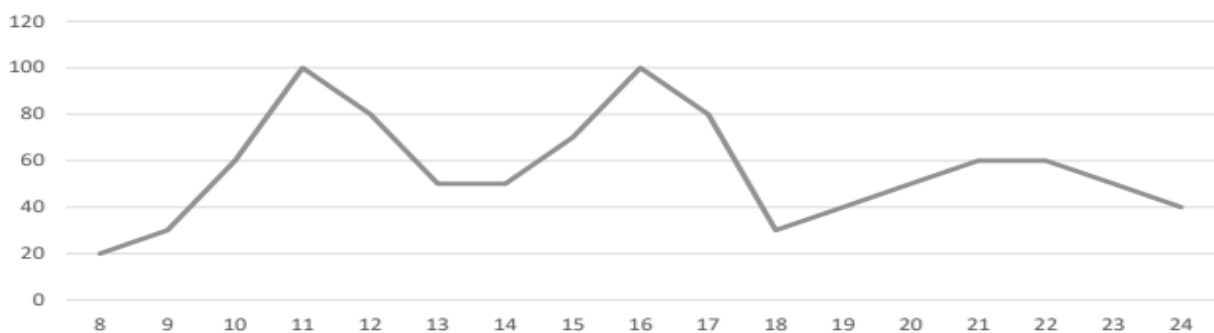


Рисунок 3.9 - Розподіл трафіку на протязі доби

Фізичний та канальний рівні представлені у вигляді бінарного (неорієнтованого) графу, який зображений на рисунку 3.10.

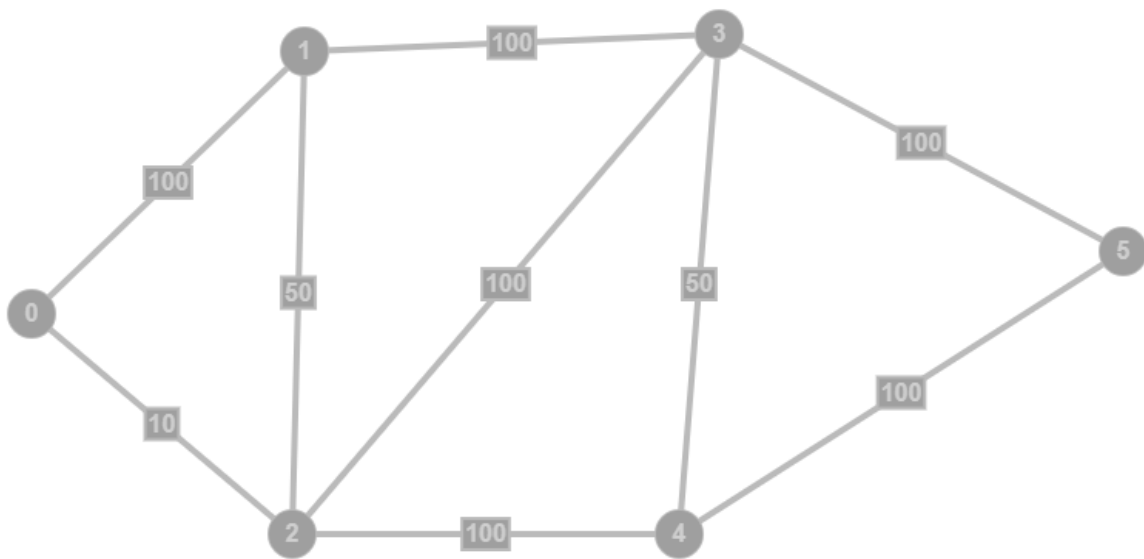


Рисунок 3.10 - Транспортна мережа у вигляді неорієнтованого графу

Вершинами є фізичні пристрої мережі, такі як: комутатори, маршрутизатори, або комп'ютери. Ребра графу - канали зв'язку мережі. Цифри на ребрах позначають їх пропускну здатність. Таким чином можна відобразити як корпоративні мережі компанії, де у якості вузлів будуть комп'ютери, так і великі регіональні мережами, де вузлом є регіональний або районний комутатор.

При симуляції засобами програмування такий граф може бути зображений у вигляді матриці пропускних здатностей, де стовпці та рядки є вузлами, а на перетині відображено пропускну здатність каналу зв'язку між вузлами.

Приклад матриці пропускних здатностей для мережі з  $n$  вузлів представлено в таблиці 3.2 [124].

Для знаходження найшвидших та найменш завантажених маршрутів використовується модифікований алгоритм Дейкстри.

Запропонований метод конвертує матрицю пропускних здатностей у матрицю затримок на каналах мережі у зворотній пропорції за формулою (3.1).

Таблиця 3.2 - Матриця пропускних здатностей

	1	2	3	4	5	...	n
1	*	100	1000	100	-		-
2	100	*	100	-	2400		-
3	1000	100	*	-	100		-
4	100	-	-	*	-		-
5	-	2400	100	-	*		-
...						*	-
n	-	-	-	-	-	-	*

Таким чином, прийнявши затримку на каналі зв'язку за вагу ребра графу, ми застосовуємо алгоритм Дейкстри для знаходження найкоротшого (з мінімальною затримкою) маршруту для передачі даних. Однак однією з найважливіших функцій цього рівня є не тільки побудова маршруту передачі даних, але й розділення інформації на декілька потоків даних, які будуть незалежно передані різними маршрутами.

Тобто деяка кількість інформації буде поділена між  $k$  маршрутами у пропорції, відповідній до важливості маршруту, яка в свою чергу залежить від кількості знаходжень цього маршруту під час їх пошуку. Тоді можна обчислити коефіцієнт використання маршруту  $k$ :

$$K_{u_k} = \frac{n_k}{i} \quad (3.2)$$

де  $n_k$  – кількість знаходжень маршруту  $k$  під час пошуку маршрутів;

$i$  – кількість проведених ітерацій симуляції.

Виходячи з цього модель мережевого рівня розподіляє кількість інформації між знайденими маршрутами за наступною формулою:

$$df_{j,k} = K_{U_k} R_j, \quad (3.3)$$



де  $df_{j,k}$  – кількість даних, яка має бути передана по маршруту  $k$  у межах  $j$  вимоги на передачу даних;

$R_j$  – вимога на передачу даних;

$K_{u_k}$  – коефіцієнт використання маршруту  $k$ .

Симуляція роботи транспортного рівня дозволяє передавати частину потоку даних у залежності від навантаження мережі в цілому. Тобто, якщо мережа перевантажена, деяка кількість даних буде відкладена на наступну ітерацію симуляції, допоки мережа не перейде в стабільний стан. Саме інтерпретація функцій транспортного рівня і є новизною запропонованого методу.

Функціонування мережі, а саме розподілу даних у ній, може бути представлено за допомогою різницевих рівнянь:

$$df_{j,i+1} = df''_{j,i} + df_{j,i+1},$$

де  $df''_{j,i}$  – це потік даних, який не був переданий за потреби  $j$ , на  $i$ -й ітерації симуляції;

$df_{j,i+1}$ , – це потік даних, який не був переданий за потреби  $j$ , на  $i$ -й ітерації симуляції, та був перенесений на наступну ітерацію;

Обсяг даних, які мають бути перенесені на наступну ітерацію, розраховується на основі затримки на каналі зв'язку із формули (3.1).

Тобто у разі перевантаження на каналі зв'язку вираховується коефіцієнт перевантаження, цей коефіцієнт дозволяє оцінити ступінь перевантаження каналу зв'язку.

$$K_{o_c} = 1 - K_l \frac{TP_c}{df_c}, \quad (3.4)$$

де  $K_{o_c}$  – перевантаження на каналі  $c$ ;

$TP_c$  – максимальна пропускна здатність каналу  $c$ ;

$K_l$  – коефіцієнт максимального навантаження, який задається перед початком симуляції, він визначає максимально допустиму завантаженість каналів мережі;

$df_c$  – потік даних, який має бути переданий по каналу  $c$ .

Оскільки сесії передачі даних поділяють ресурси мережі між собою нерівномірно, наступним етапом є отримання коефіцієнту утилізації ресурсів каналу конкретною вимогою на передачу даних.

$$Ku_j = \frac{df_j}{df_c}, \quad (3.5)$$

де  $Ku_j$  – відносна величина використання каналу для вимоги  $j$ ;

$df_j$  – потік даних які передає сесія  $j$ ;

$df_c$  – увесь потік даних на каналі  $c$ ;

Для визначення валідного обсягу даних, які можуть бути передані вимогою  $j$  на  $i$ -й ітерації, використовуються наступні обчислення:

$$df'_j = df_j - Ko_c df_{j,k}, \quad (3.6)$$

де  $df'_j$  – це скоректований потік даних для вимоги  $j$ , один з маршрутів якої перевантажував один з каналів зв'язку мережі;

$df_j$  – потік даних, який має бути переданий за потребою  $j$ ;

$df_{j,k}$  – за формулою (3.3), це потік даних по маршруту  $k$  вимоги  $j$ , який перевантажує канал зв'язку  $c$ ;

$Ko_c$  – за формулою (3.4), це коефіцієнт перевантаження каналу зв'язку  $c$ .

Останнім етапом функціонування транспортного рівня є розрахунок кількості інформації, яка має бути відкладена на наступну ітерацію:

$$df''_j = df_j - df'_j, \quad (3.7)$$

де  $df''_j$  – кількість даних, які не змогли передатися по маршруту  $k$  вимоги  $j$  через перевантаження каналу зв'язку  $c$  (3.5);

$df_j'$  – скоректований потік даних по маршруту  $k$  вимоги  $j$ , який перевантажував один з каналів зв'язку  $c$ ;

$df_j$ – за формулою (3.3), це потік даних по маршруту  $k$  вимоги  $j$ , який перевантажує один з каналів зв'язку  $c$ .

Отже увесь процес моделювання можна описати наступним чином: аналітик надає інформацію щодо прогнозованого навантаження на комп'ютерну мережу впродовж деякого часу, користувач інформаційної технології моделює деяку топологію мережі за допомогою візуального інструменту та починає процес симуляції за допомогою вищезазначеного методу. На основі математичної моделі, яка має бути реалізована у розрахунковому модулі інформаційної технології, поетапно проводяться обчислення та надається користувачу інформація про стан мережі на кожній ітерації, а саме, кількість переданих даних, затримки на каналах зв'язку, навантаження на мережу, тощо. Після закінчення роботи симуляції, користувач може прийняти рішення про затвердження поточного варіанту структури мережі або про реконігурацію топології. Реконфігурація може бути викликана тим, що поточний варіант топології транспортної мережі зв'язку не здатен обробити надану кількість запитів, або навпаки не оптимально використовує ресурси мережі, що призводить до надлишковості, та збитковості такого варіанту комп'ютерної мережі.

Приведемо приклад моделювання поведінки комп'ютерної мережі.

1. Першим шагом методу є опис топології мережі, тобто географічне розташування вузлів та каналів зв'язку. Розглянемо спрощений варіант топології мережі, приведений на рисунку 3.11.

На рисунку зображений тестовий макет комп'ютерної мережі в її початковому стані. Вузлами графу є маршрутизатори комп'ютерної мережі, а ребрами – канали зв'язку відповідно. Кожне з ребер позначене своєю максимальною потужністю каналу (Channel capacity).

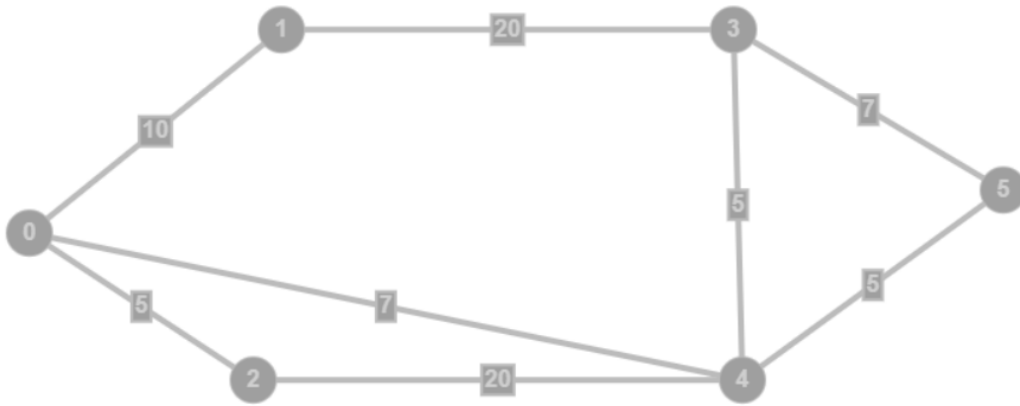


Рисунок 3.11 - Тестова топологія мережі

2. Наступним кроком є обрання вхідних даних для моделювання. Обираємо структуру вхідних даних відповідно до середнього навантаження на комп'ютерні мережі у світі [8] (див. рис. 2.8).

Надалі вважатимемо основною вимогою на передачу даних обсяг інформації, який має бути переданий за вказаний проміжок часу. Зважаючи на те, що на тестовому макеті вказані абсолютні значення, а на рисунку 2.8 відносні, перед їх використанням потрібно прив'язати абсолютні значення до коефіцієнтів з рисунку 2.8. Вважатимемо, що значення  $-2.00$  дорівнює  $0$  вимог на передачу даних, а значення  $+2.00$  дорівнює  $120$  вимогам на передачу даних. При цьому одна вимога на передачу дорівнює бітрейту  $1\text{Mbit/s}$ .

Для найбільш показної демонстрації методу з урахуванням відмінності мережевого трафіку, візьмемо за основу відрізок часу з 10 години до 22, умовно спростивши його до п'яти ітерацій моделювання, де кожна з ітерацій уособлює пікове значення динаміки трафіку (рис. 3.12).

3. Розподіл заявок на передачу даних за напрямками. Напрямки для передачі даних будуть поділяти це навантаження між собою та можуть бути представлені у вигляді таблиці розподілу заявок на передачу даних (табл. 3.3).

Згідно із таблицею на протязі моделювання буде існувати дві сесії передачі даних, при цьому друга сесія закінчиться о 20-ій годині.

Нехай перший напрямок буде проходити від нульового до п'ятого вузла, а другий напрямок від першого до четвертого.

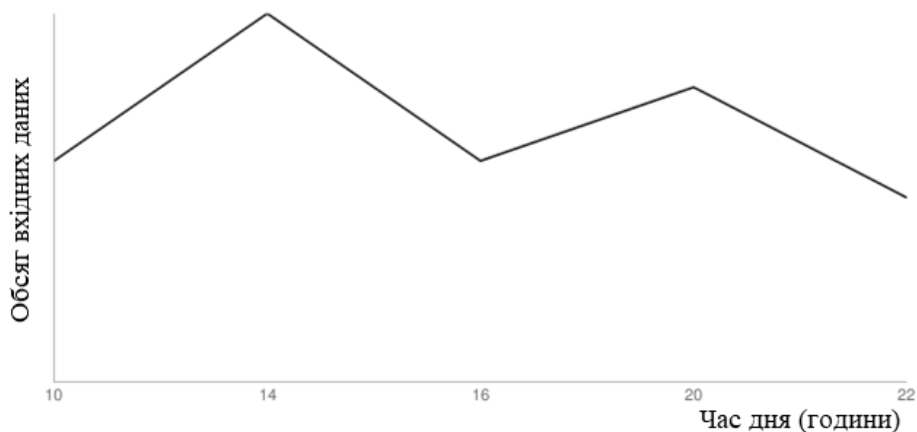


Рисунок 3.12 - Структура вхідних даних для моделювання

Таблиця 3.3. - Розподіл заявок на передачу даних

Напрямок	10-та година	14-та година	16-та година	20-та година	22-га година
1	5	7	3	7	5
2	1	3	3	1	

4. Побудова першого варіанту маршрутів передачі даних. На початку моделювання буде побудовано два маршрути із використанням алгоритму Дейкстри (рис. 3.13). Суцільною прямою позначений маршрут першого напрямку, а пунктирною - другого відповідно.

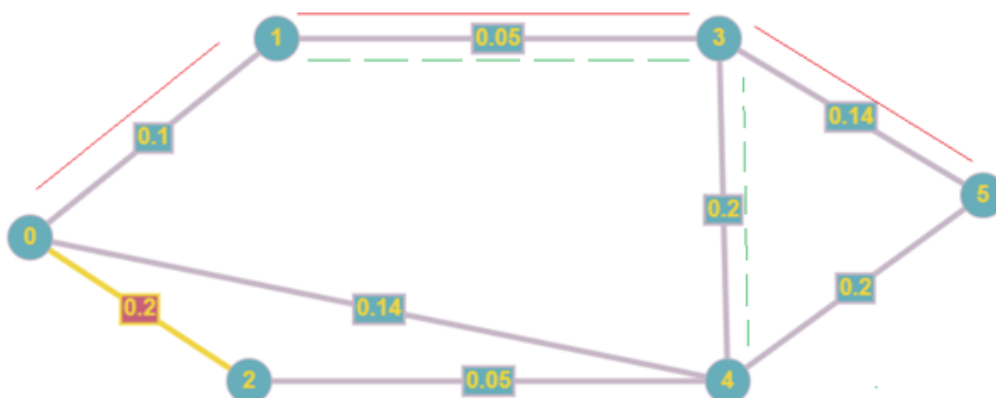


Рисунок 3.13 - Маршрути передачі даних на першій ітерації

5. Наступним кроком є насичення вказаних ребер вимогами на передачу даних із таблиці 3.3. Згідно із алгоритмом вимоги розподіляються із урахуванням «популярності» маршруту передачі даних. «Популярність» – є частота використання маршруту під час однієї сесії передачі даних. Чим вища «популярність», тим більша частка вимоги буде передана цим маршрутом. Оскільки на першій ітерації було знайдено лише по одному маршруту для кожного напрямку передачі, ними буде передано 100% кожної з вимог.

Стан мережі після насичення приведений на рисунку 3.14.

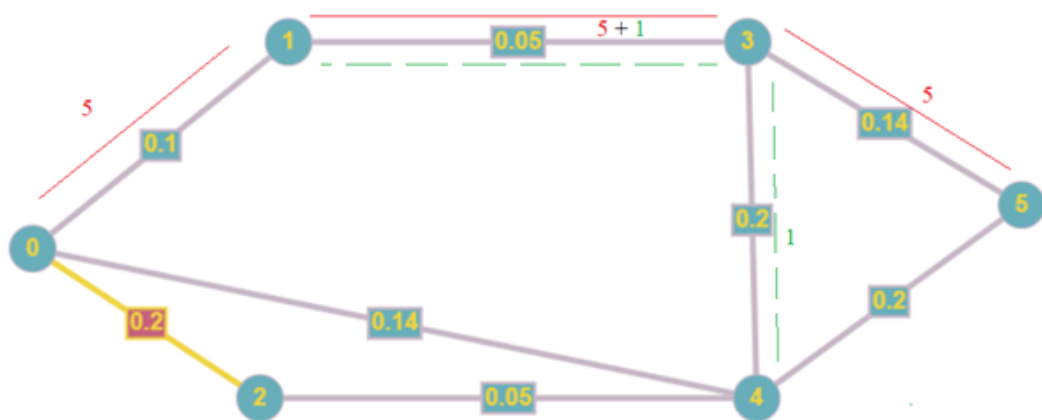


Рисунок 3.14 - Мережа, що насичена вимогами на передачу даних

Таким чином цей стан мережі є початковою інформацією для розрахунків на наступній ітерації.

6. Важливо також скорегувати таблицю розподілу заявок на передачу даних згідно із ймовірних втрат на канальному рівні транспортної мережі.

Візьмемо за умовний коефіцієнт втрати у 15% [125] від зазначеного рівня вимог на передачу даних. Виходячи з цього, таблиця 3.3 після першої ітерації буде виглядати так, як показано у таблиці 3.4.

Стан мережі на другій ітерації моделювання (згідно із формули розрахунку затримок на каналах зв'язку) приведений на рисунку 3.15.

Таблиця 3.4 - Розподіл заявок на передачу даних після першої ітерації

Напрямок	10-та година	14-та година	16-та година	20-та година	22-га година
1	5	<b>7.75</b>	3	7	5
2	1	<b>3.15</b>	3	1	

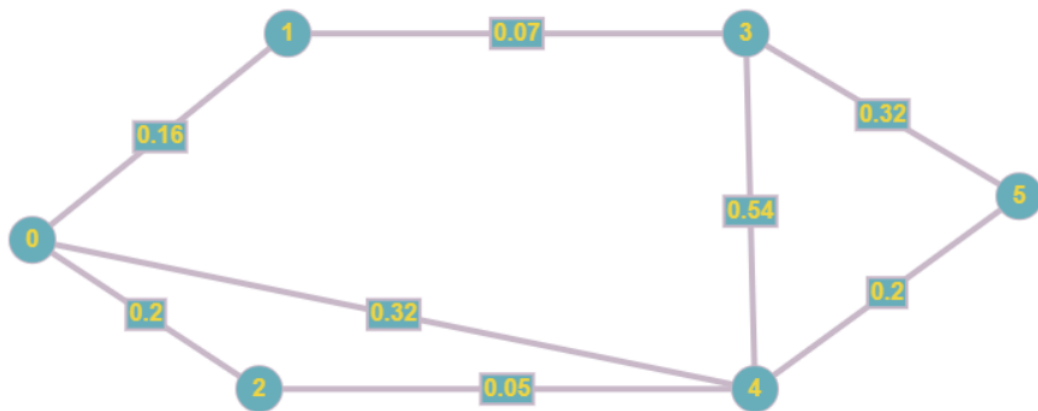


Рисунок 3.15 - Мережа перед другою ітерацією моделювання

На цьому етапі знову застосовується алгоритм Дейкстри, однак оскільки на кожній  $i$ -й ітерації шукаємо  $i$  маршрутів, зараз будемо шукати по два маршрути для кожного напрямку передачі даних (рис. 3.16).

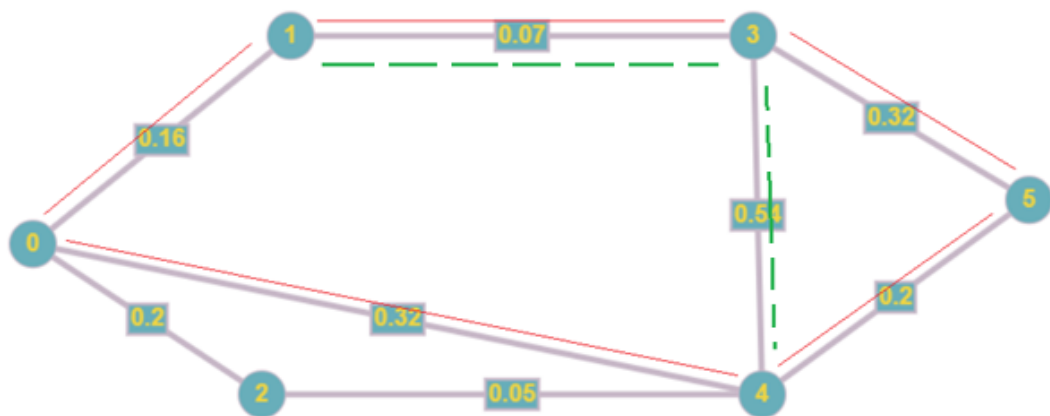


Рисунок 3.16 - Маршрути передачі даних на другій ітерації

Як видно з рисунку 3.16, маршрути для другого напрямку передачі залишилися незмінними, маршрут 1 – 3 – 4 все ще залишається найкоротшим, однак для першого напрямку було побудовано два маршрути: маршрут 0 – 1 – 3 – 5 залишився незмінним з першої ітерації, та новий маршрут 0 – 4 – 5.

7. Далі переходимо до насичення мережі вимогами на передачу даних, однак тепер вимоги для першого напрямку будуть поділятися на два маршрути (рис. 3.17).

Останнім кроком на цій ітерації буде перерозподіл таблиці 2 згідно з втратами каналного рівня (табл. 3.4).

Аналогічним чином можуть бути розраховані усі наступні ітерації моделі.

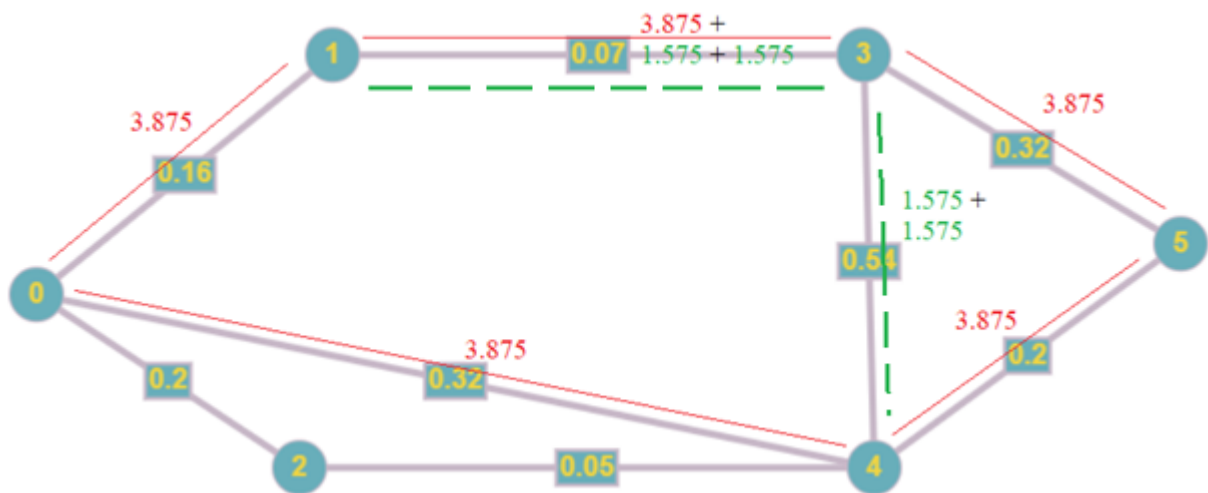


Рисунок 3.17 - Мережа насичена вимогами на передачу даних

Таблиця 3.5 - Розподіл заявок 5 на передачу даних після другої ітерації

Напрямок	10-та година	14-та година	16-та година	20-та година	22-та година
1	5	<b>7.75</b>	<b>4,1625</b>	7	5
2	1	<b>3.15</b>	<b>3,4725</b>	1	



### 3.5 Модель оцінки навантаження в комп'ютерній мережі з емуляцією механізму ковзаючого вікна

Якість передачі різних типів трафіка в мережах залежить і від нижніх рівнів моделі OSI (рис. 3.18). Розглядаючи транспортний рівень моделі OSI, слід врахувати, що він забезпечує послуги з транспортування даних [126]. Як було зазначено вище, головною метою транспортного рівня є вирішення таких питань, як забезпечення надійного транспорту даних через об'єднану мережу. Транспортний рівень призначений для доставки даних без помилок, втрат і дублювання в тій послідовності, в якій вони були передані. При цьому немає значення, які дані передаються, звідки і куди, тобто він визначає сам механізм передачі. Блоки даних він розділяє на фрагменти, розмір яких залежить від протоколу.

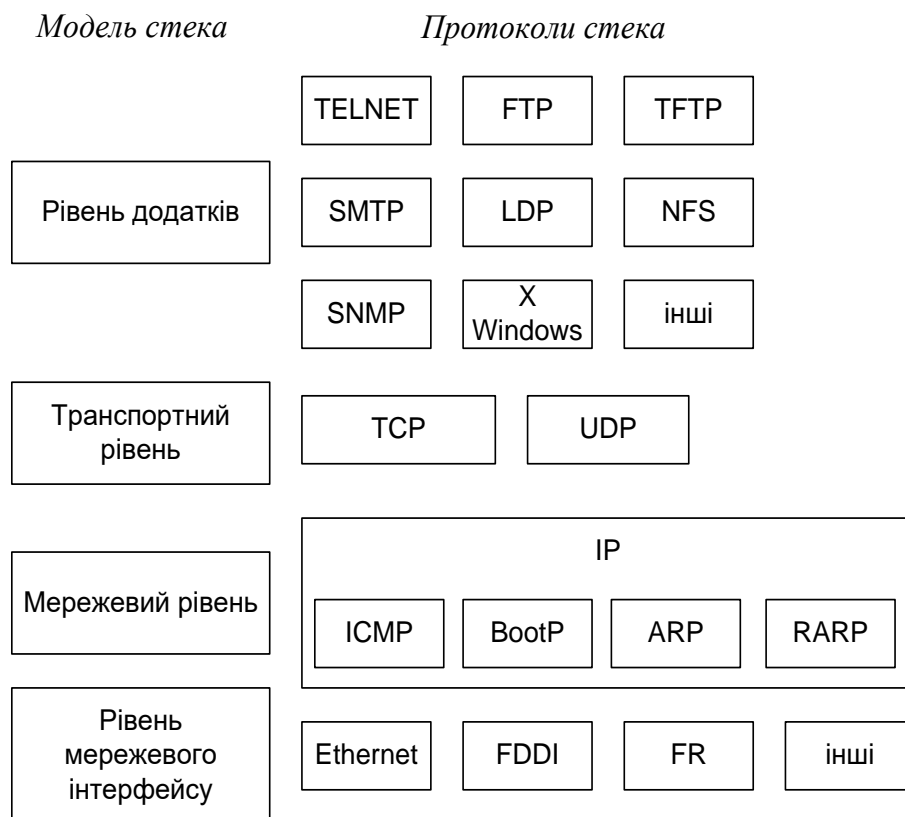


Рисунок 3.18 - Протоколи моделі стека TCP/IP

Забезпечення надійної передачі інформації на всіх рівнях протоколів базується на механізмах квітування та ковзаючого вікна. Вказані механізми забезпечуються такими методами:

- зменшення надлишковості при передачі інформації – Нагля, Кларка,
- виявлення перевантаження – TCP Vegas,
- управління розміром вікна – Slow Start, Binary Increase та таймером повторної передачі – Джекобсона) [126].

Перш ніж розглядати механізм ковзаючого вікна, варто описати принцип дії TCP протоколу, а саме потребу на отримання підтвердження відправлених байтів інформації. Це суттєво зменшує швидкість передачі даних, оскільки на передачу одного пакету інформації буде проведено декілька сесій з'єднання. Наприклад, перед відправленням TCP протокол має впевнитися в існуванні отримувача, після чого виконується three-way-handshake для встановлення сесії. Також оскільки TCP протокол відрізняється від UDP протоколу саме надійністю передачі даних, то кожен сегмент під час передачі маркується порядковим номером, який отримувач відправляє назад відправнику для підтвердження відправки та для вказування наступного сегмента, який повинен бути відправлений.

Пакети TCP протоколу мають такі поля: локальний порт відправника і локальний порт одержувача (рис. 3.19), що мають зміст точок входу в програму, наприклад Telnet з одного боку, і точку входу (в даному контексті інкапсуляцію) в рівень IP. Крім того, в стеку TCP/IP саме рівень TCP відповідає за формування пакетів з потоку даних, які йдуть від користувача.

У протоколі TCP реалізований різновид алгоритму квітування з використанням вікна. Особливість цього алгоритму полягає в тому, що вікно визначено на множині нумерованих байт неструктурованого потоку даних, що надходять з верхнього рівня і буферизуються протоколом TCP.

Принцип дії ковзаючого вікна (sliding window) [127] дозволяє використовувати протокол TCP у мережах різної потужності та надійності.

Локльний порт відправника		Локльний порт одержувача	
Позиція сегменту			
Перший очікуваний байт			
Зміщення даних		Флаг	Розмір вікна
Контрольна сума		Примітка срочності даних	
Опції		Заповнювач	

Рисунок 3.19 - Структура заголовку TCP пакету

Механізм ковзаючого вікна дозволяє змінювати кількість байтів, які можуть бути відправлені без підтвердження. Таким чином, чим більша надійність мережі - тим більший розмір такого вікна і тим більше інформації може бути відправлено без підтвердження. В результаті з боку користувача забезпечується збільшення швидкості передачі даних. У випадку коли TCP бачить, що дані втрачаються - розмір вікна зменшується, що зменшує швидкість передачі за рахунок збільшення надійності та кількості перевірок.

Розгорнутий алгоритм ковзаючого вікна не буде застосований напряду в даній роботі, оскільки його реалізація в запропонованій моделі суттєво відрізняється та зберігає лише найголовніші його етапи, а саме:

- контроль за кількістю помилок;
- визначення розміру вікна;
- корегування розміру трафіку, який буде переданий.

Нехай обсяг даних, який має бути переданий дорівнює  $df_c$ , а вже існуюча затримка на каналі зв'язку дорівнює  $d_c$  (3.1).

Коли  $d_c$  перевищить максимально допустимий коефіцієнт якості зв'язку  $Q_k$ , ввімкнеться модель ковзаючого вікна, яка у реальній мережі збільшила би кількість байтів, які мають надсилати підтвердження, що в свою чергу зменшило би кількість обсягів даних користувача, який може бути переданий за

вказаний проміжок часу. У пропоновані моделі можна зменшувати обсяг даних користувача безпосередньо.

Таким чином нехай на каналі зв'язку  $c$  виникає перевантаження у розмірі  $O_c$ . Це може означати, що обсяг трафіку, який має бути переданий цим каналом бути зменшений на наступної величину:

$$df_c^* = (d_c - O_c)f_c.$$

Вважаючи, що одним каналом може передаватися інформація різних напрямків [77], наступним кроком моделі буде визначення усіх напрямків передачі, які задіють вказаний канал. А також однією з ключових особливостей моделі OSI є те, що рівні не втручаються в роботу один одного, а розширюють їх функціонал. Це призводить до того, що на транспортному рівні може не бути інформації про структуру маршрутів, які були побудовані на попередньому мережевому рівні. Тому корегувальний вплив має розповсюджуватись не на вказаний маршрут, а на увесь напрям передачі даних.

Після цього в моделі може бути зменшений обсяг інформації для кожного з напрямків у розмірі, що прямо пропорційний їхній утилізації вказаного перевантаженого каналу.

Позначимо загальну множину можливих напрямків передачі  $R$ . Тоді обсяг даних, який має бути відкладений на напрямку  $r \in R$ :

$$df_r^* = (d_c - O_c)f_r,$$

де  $d_c$  – розмір затримки на каналі  $c$ , який перевищує максимально дозволений коефіцієнт,

$O_c$  – обсяг, на який перевищено допустиму кількість переданих даних. Він вираховується на основі  $d_c$  та константи  $M$ , яка має бути вказана перед початком моделювання,

$f_r$  – обсяг даних, який має бути переданий на певній ітерації моделі у напрямку  $r$ .

Після цього ітерація має бути перерахована вже із зміненими показниками  $df_r$ .

Однак розрахунки на тестовому стенді показали неадекватність такої моделі, що викликано можливістю багаторазового перевантаження мережі на протязі однієї ітерації. Це призводить до багатократної корекції одних й тих самих напрямків передачі  $r$  з підмножини  $R' \in R$ , що в свою чергу призводить до необґрунтовано великого зменшення обсягів трафіку  $df_r$ .

Для вирішення цієї проблеми запропоновано використовувати вектор корекції для кожного напрямку  $r \in R$ . Таким чином для кожного напрямку  $r$  розраховується максимальний обсяг перевантаження, який дорівнює:

$$v_r = \max_i (df_{c_1}^*, \dots, df_{c_i}^*, \dots, df_{c_n}^*) ,$$

де  $df_{c_i}^*$  - обсяг усіх перевантажень, на усіх каналах зв'язку, які утилізуються за напрямком  $r$ ,  $i = 1..n$ .

Отже у ситуації, коли напрямок зв'язку  $r$  багаторазово викликає перевантаження, кількість його корегувань буде завжди дорівнювати одиниці, а значення корегування – його максимальному перевантаженню мережі.

Для визначення перевантаження у моделі будемо використовувати додатковий цикл обчислень за наступною формулою:

$$O_c = \frac{df_c - MC_c}{df_c} .$$

У запропонованій моделі додатковий раунд має виконуватися у випадку перевантаження мережі, а саме у випадку, коли затримки на каналах матимуть негативне значення, або значення більше одиниці.

Проведемо моделювання поведінки комп'ютерної мережі при перевантаженні, продовжуючи приклад, наведений у розділі 3.4.

Додамо умову, що обсяг даних, який має бути переданий о 16 годині значно збільшиться. Отримаємо розподіл, приведений у таблиці 3.6.

Таблиця 3.6 – Розподіл замовлень на передачу даних зі збільшеними показниками

Напрямки передачі даних	Часові параметри моделювання				
	10-та година	14-та година	16-та година	20-та година	22-та година
1	5	7.75	<b>20</b>	7	5
2	1	3.15	<b>15</b>	1	

За допомогою алгоритму Дейкстри було знайдено ще два маршрути для обох напрямків передачі. Обсяг передачі для маршрутів першого напрямку буде дорівнювати 6.6, а для маршрутів другого 10 і 5 відповідно їх пріоритету (рис. 3.20).

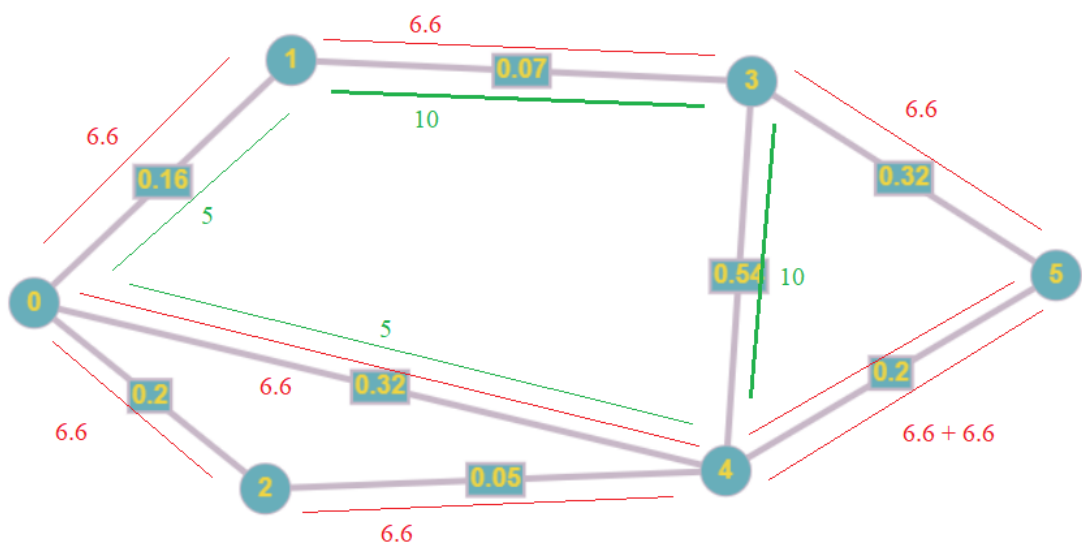


Рисунок 3.20 - Маршрути передачі даних на третій ітерації після насичення вимогами

Після перерахунку затримок отримаємо наступну структуру транспортної мережі (рис. 3.21). Як видно з рисунку, перевантаження виникло одночасно на шести каналах зв'язку, і вимоги потребують корекції.

В моделі треба перерозподілити певний обсяг трафіку, виходячи із ступеня перевантаженості.

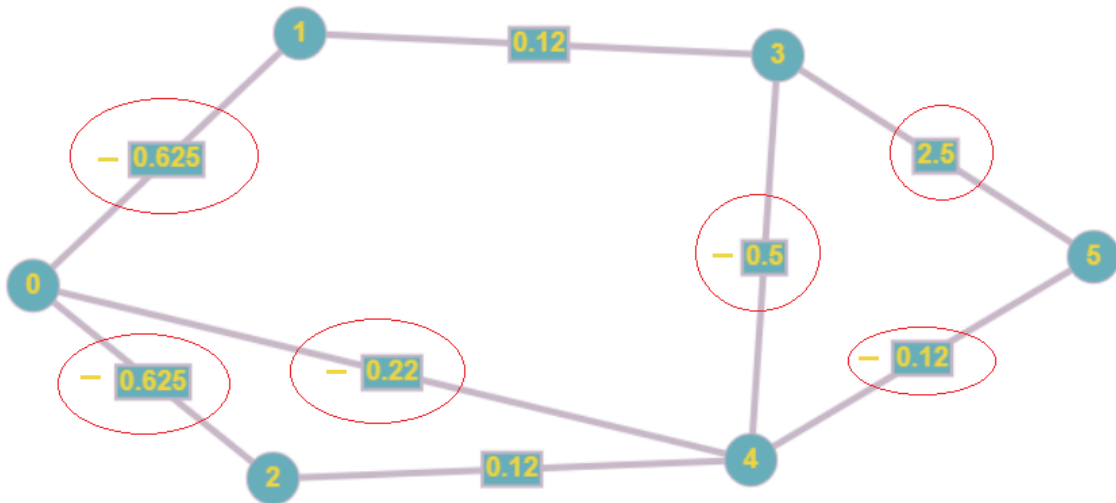


Рисунок 3.21 - Затримки на каналах зв'язку під час перевантаження

В першу чергу потрібно виявити перевантаження кожного з каналів зв'язку за формулою (в даному прикладі коефіцієнт навантаження  $M = 0.85$ ):

$$O_{0-1} = \frac{11.6 - 0.85 * 10}{11.6}$$

Відповідно  $O_{0-2} = 0.36$ ;  $O_{0-4} = 0.49$ ;  $O_{3-4} = 0.58$ ;  $O_{3-5} = 0.10$ ;  $O_{4-5} = 0.68$ .

Наступним чином визначимо вектор корекції для обох напрямків передачі. Для цього розподілимо перевантаження на каналах зв'язку за напрямками передачі даних:

$$v_1 = \max\{0.27, 0.36, 0.49, 0.58, 0.1, 0.68\} = 0.68 ;$$

$$v_2 = \max\{0.27, 0.49, 0.58\} = 0.58 .$$

Тепер в моделі здійснюється перенос залишку даних на наступну ітерацію в два етапи, по-перше 15% від обсягу даних буде перенесено автоматично за рахунок втрат при передачі, а по-друге буде перенесено обсяг даних, який викликає перевантаження. Таким чином отримаємо таблицю 3.7 розподілу замовлень.

Таблиця 3.7 – Розподіл замовлень після зменшення навантаження на мережу

Напрямки передачі даних	Часові параметри моделювання				
	10-та година	14-та година	16-та година	20-та година	22-та година
1	5	7.75	<b>6.4</b>	<b>7 + 3 + 13.6</b>	5
2	1	3.15	<b>6.3</b>	<b>1 + 2.25 + 8.7</b>	

Останній крок даної ітерації - перерахунок моделі із зміненим навантаженням. Перерахунок затримок дає результат, який показаний на рисунку 3.22. Очевидним є те, що перевантаження було виправлено, однак найбільшою цінністю даної моделі, є саме те, що після корегування видно так звані bottleneck – вузькі місця системи, які потрібно змінювати для підвищення коефіцієнту утилізації мережевих ресурсів. На рисунку ці вузькі місця обведені в коло. Канали зв'язку 3-4 та 4-5 небезпечно наблизилися до максимально допустимого коефіцієнту навантаження  $M$ , який дорівнює 0.85.

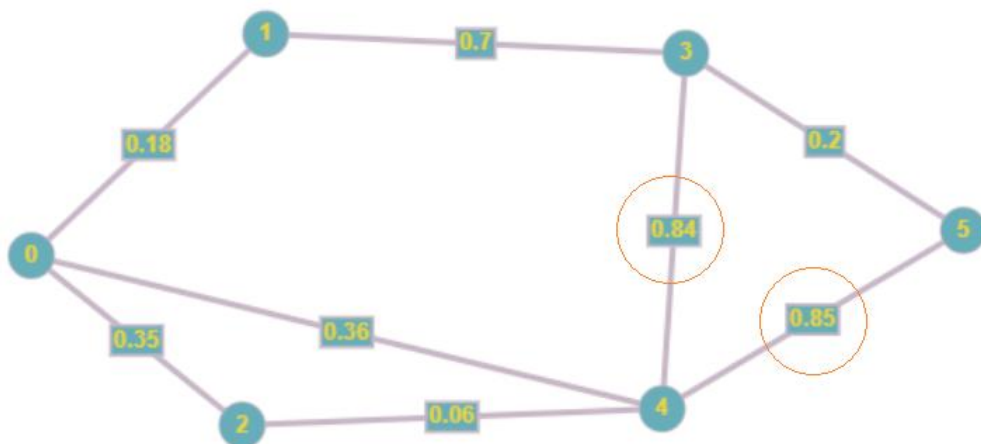


Рисунок 3.22 - Затримки на каналах зв'язку після корегування навантаження



### 3.5 Висновки до розділу

В процесі дослідження проблематики створення та модернізації існуючих комп'ютерних мереж, був запропонований метод оцінювання параметрів комп'ютерної мережі на основі моделювання, оптимізації та перебудови структури мережі. Цей метод складається з декількох алгоритмів, які дозволяють перетворити існуючу структуру комп'ютерної мережі у квазіоднорідну структуру, що значно підвищить її ефективність за рахунок збереження коштів на надлишкові канали зв'язку, та дозволить використати вже наявні ресурси.

Запропоновано метод імітаційного моделювання мережі передачі даних, який, на базі спостережень, та алгоритмів роботи нижніх рівнів моделі OSI, дозволяє дати відповіді на наступні питання: чи буде структура мережі стабільною та увесь спектр обладнання буде використовуватися з максимальним навантаженням, та чи замовник не втратить прибуток. Метод дозволяє формально представити характеристики фізичного, каналного, мережевого та частково транспортного рівнів моделі OSI, де у якості вхідних даних використовується динаміка навантаження на мережу упродовж часу.

Таким чином, вперше розроблено метод оцінювання параметрів комп'ютерної мережі, який на відміну від існуючих, оснований на моделюванні її структури з урахуванням фрактальних властивостей трафіку, що дозволить обґрунтувати прийняття рішення щодо впровадження нових послуг.

Із застосуванням запропонованого методу можна створити інформаційно-моделюючу технологію, яка б дозволила провести симуляцію передачі даних у мережі на протязі певного відрізка часу. Із формалізованих у розділі функцій видно, що мережа описана лише декількома характеристиками та ігнорує такі фактори, як помилки на рівні додатків, або формат самих даних, які мають бути передані тощо. Це в свою чергу є водночас як проблемою даної моделі так і її перевагою, оскільки дозволяє більш гнучко масштабувати мережу та навіть використовувати цю модель для симуляції інших транспортних задач.

Додано розрахункову модель транспортного рівня комп'ютерної мережі. Вона реалізована у вигляді механізму ковзаючого вікна для перерозподілу трафіку, який не може бути переданий на певній ітерації моделі через низьку пропускну здатність мережі, зависокі вимоги на передачу даних, тощо. Завдяки цьому можна буде аналізувати поведінку мережі на прикладах перевантажень, які виникатимуть у моделі та у реальній комп'ютерній мережі.

В результаті набула подальшого розвитку модель оцінки навантаження в комп'ютерній мережі шляхом емуляції механізму ковзаючого вікна, що дозволяє виявити перевантаження в процесі імітаційного моделювання мережі.

Запропонований метод, а також його подальша реалізація у вигляді інформаційної технології моделювання дозволить суттєво зменшити вартість та спростити процес модернізації комп'ютерної мережі.

Результати даного розділу опубліковано в роботах [1 – 5, 9 - 12].

## РОЗДІЛ 4

### ПРИКЛАДНА ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ ІМІТАЦІЙНОГО МОДЕЛЮВАННЯ КОМП'ЮТЕРНИХ МЕРЕЖ

#### **4.1 Архітектура прикладної інформаційної технології імітаційного моделювання**

Під час вибору архітектури інформаційної технології імітаційного моделювання (ІТІМ) були проаналізовані декілька моделей побудови програмного забезпечення (ПЗ), а саме: монолітна система, мікросервісна система, та система, побудована за допомогою залучення cloud computing.

Проаналізувавши сучасні підходи до розробки інформаційних технологій, можна зробити висновок, що монолітна структура є найменш доцільною з огляду на наступні проблеми:

- високі вимоги до персоналу під час розгортання ПЗ. Дуже часто кожна конкретна монолітна система вимагає навчання персоналу для її обслуговування;
- вимоги до підтримки інфраструктурних та серверних потужностей on-premise, або розгорнутих на сторонніх серверах;
- проблеми з модернізацією структури програмного продукту, низька швидкість розробки;
- відсутність гнучкого механізму масштабування обчислювальних потужностей;
- відсутність можливості масштабувати фінансових витрат.

Однак, монолітна структура має наступні переваги:

- спрощена розробка програмного забезпечення (ПЗ). Монолітний підхід широко використовувався на протязі довгого періоду часу та не вимагає додаткових знань;
- нескладний етап налаштування та відлагодження;

- більш простий етап розгортання. Але залишаються високими вимоги до персоналу під час деплоюменту.

Мікросервісна архітектура є однією з найпопулярніших та широко застосованих під час розробки ПЗ на протязі останніх років. Цей тип архітектури не має недоліків монолітної, тобто:

- розгортання мікросервісів зазвичай легше, тому що кожен сервіс є невеликою незалежною системою. Помилки, які можуть виникнути під час деплоюменту буде легше знайти та визначити їх причину;
- мікросервіси не вимагають складного налаштування інфраструктури, вони легше розгортаються на сторонніх серверах, або в хмарних системах;
- модернізація ПЗ при застосуванні мікросервісами набагато легша, бо кожен елемент системи є незалежною підсистемою, яка може розроблятися окремо, з використанням різних засобів та технологій розробки;
- для масштабування мікросервісів достатньо розгорнути додаткові інстанси сервісу для збільшення обчислювальної здатності.

Водночас мікросервісна архітектура висуває певні вимоги на розробників, а саме:

- ускладнення керування процесом розробки (особливо для систем великого розміру);
- важкість обслуговування. Зазначимо, що такий недолік притаманний і монолітній системі, але різниця полягає в тому, що обслуговування монолітної системи вимагає навчання персоналу під конкретну систему. Однак, робота з мікросервісною архітектурою важча за своїм складом та більше узагальнена і не вимагає якихось специфічних знань для кожної конкретної мікросервісної системи;
- спосіб спілкування сервісів між собою, а саме комунікація за допомогою мережі інтернет, або внутрішньої корпоративної мережі, або внутрішньої хмарної мережі провайдера відбуватиметься

повільніше, ніж це відбувається в монолітній системі. Тобто може виникати негативний вплив для систем з великими обсягами даних, що передаються;

- потенційна важкість під час тестування, оскільки проблеми можуть виникати в різних частинах системи, за які несуть відповідальність різні команди розробників.

Зазначимо, що майже усі з перелічених недоліків мікросервісної архітектури мають відношення до великих розподілених систем з десятків, або сотень модулів, що в свою чергу не застосовується до розробки поточної інформаційної технології.

Найбільш новітнім підходом до розробки та розгортання ПЗ є використання хмарних провайдерів, таких як Amazon AWS, Google GCP, Microsoft Azure, тощо. Такий підхід дозволяє відійти від існуючого підходу з розгортанням системи засобами розробників, або системних адміністраторів та перенести цю відповідальність на існуючу інфраструктуру провайдера. Це приносить наступні переваги:

- незалежно від підходу IaaS, Paas, Saas, етап розгортання якнайбільш мінімізується і не вимагає конкретних знань в апаратному забезпеченні;
- максимально доступна можливість масштабування. Не тільки інстанс сервіс може масштабувати додавання додаткових подій, а й самі функції можна розглядати як унітарні елементи системи (SaaS);
- шляхом використання тільки потрібних частин системи в кожен конкретний проміжок часу можна мінімізувати витрати на експлуатацію інформаційної технології;
- відповідальність за безпеку та надійність апаратних засобів переноситься на провайдера.

Серед недоліків cloud-архітектури можна відзначити:

- менший контроль за інфраструктурою;
- потенційні ризики безпеки під час використання онлайн;

- важкість інтеграції з існуючими on-premise, або розгорнутими на сторонніх серверах системами;
- у випадку невірної підбору способу розгортання можна не тільки не зменшити, а суттєво збільшити витрати на інфраструктуру.

Розглянувши існуючі варіанти архітектури, та проаналізувавши переваги та недоліки кожного з них, було прийнято рішення реалізувати прикладну інформаційну технологію імітаційного моделювання за допомогою залучення cloud-комп'ютинга. Це надасть такі переваги:

- спростить етап розгортання;
- зменшить кошти на утримання системи;
- зважаючи на велику кількість багатопоточних обчислень, дозволить масштабувати систему легко і з найменшими витратами;
- дозволить перенести відповідальність за безпеку потенційних чутливих даних (наприклад, даних про мережу користувача) на провайдера.

Обираючи cloud як інфраструктуру для розгортання ІТІМ треба визначити, який тип сервісів буде використовуватись в системі. Розглянемо варіанти сервісів IaaS, PaaS або SaaS:

- IaaS є найбільш відомим та звичним до використання механізмом надання повноцінної інфраструктури для користувача. Для розгортання ПЗ буде наданий віртуальний сервер, де розробник має налаштовувати середовище. Аналогом цього є розгортання на хостінг сервісах, де замість фізичного ресурсу використовується віртуально його представлення. Прикладами такої моделі є Amazon EC2, або Google Compute Engine;
- PaaS характеризує наступний етап в зменшенні впливу на інфраструктуру з боку розробника. Саме за допомогою цієї моделі провайдер налаштовує оточення, а розробник розгортає свій продукт у вказаний код. Прикладами такої моделі є AWS Elastic Beanstalk, або Google Cloud Run;

- SaaS є моделлю, де розробник несе найменшу відповідальність за розгортання інфраструктури і концентрується на функціональних властивостях ПЗ. Такий підхід дає найбільшу можливість масштабування обчислювальних можливостей. Прикладами даної моделі є Amazon Lambda, або Google Cloud Functions.

Враховуючи специфіку інформаційної технології, що проектується, було прийнято рішення використати гібридну структуру з використанням мікросервісів та SaaS функцій, що дозволить максимізувати масштабування системи із мінімальними витратами коштів. На рисунку 4.1 наведена запропонована архітектура інформаційної технології імітаційного моделювання.

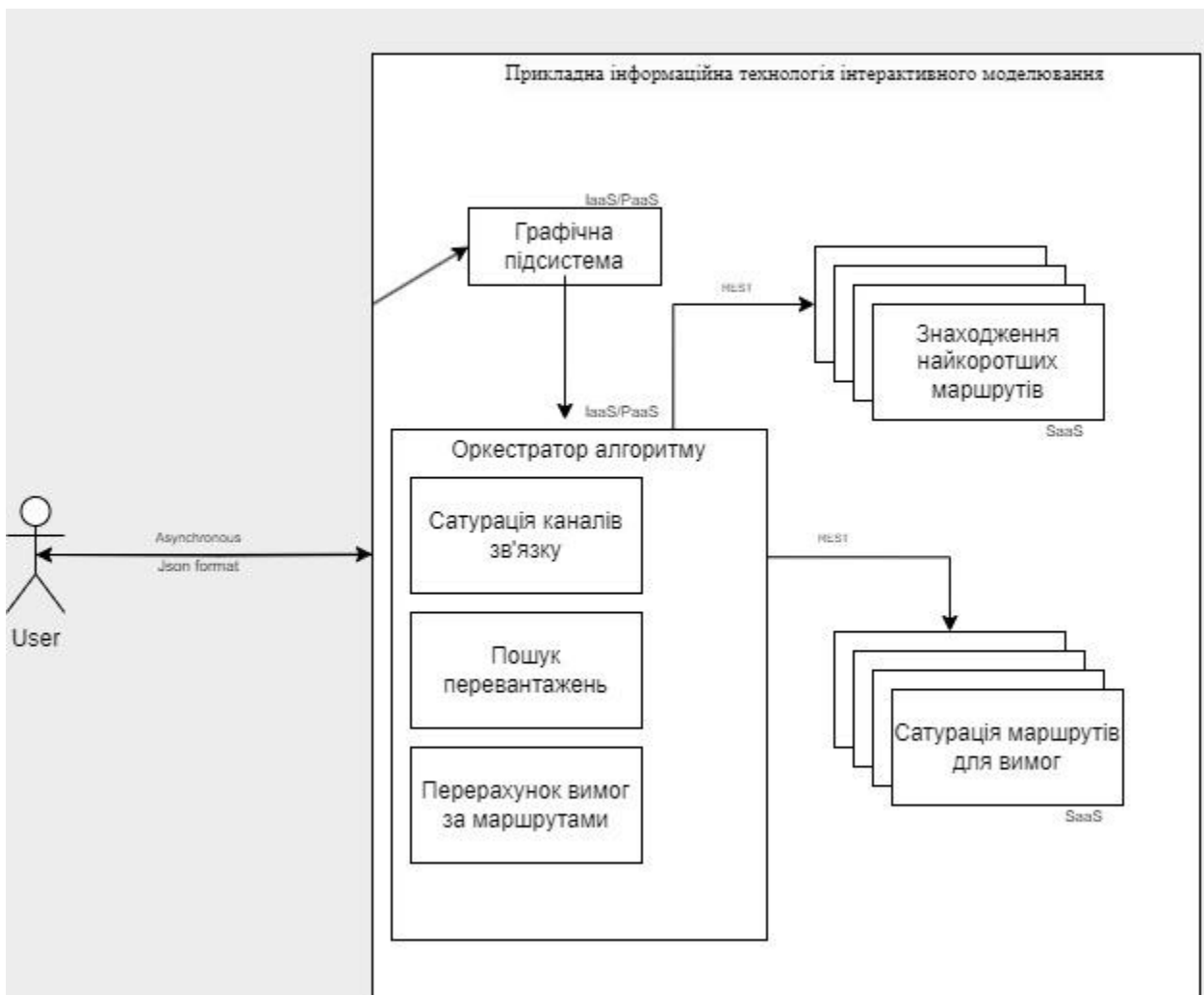


Рисунок 4.1 – Архітектура ІТІМ

Для детального опису послідовності дій окремих складових (підсистем) ІТІМ під час моделювання поведінки мережі, на рисунку 4.2 представлена діаграма послідовності роботи інформаційної технології:

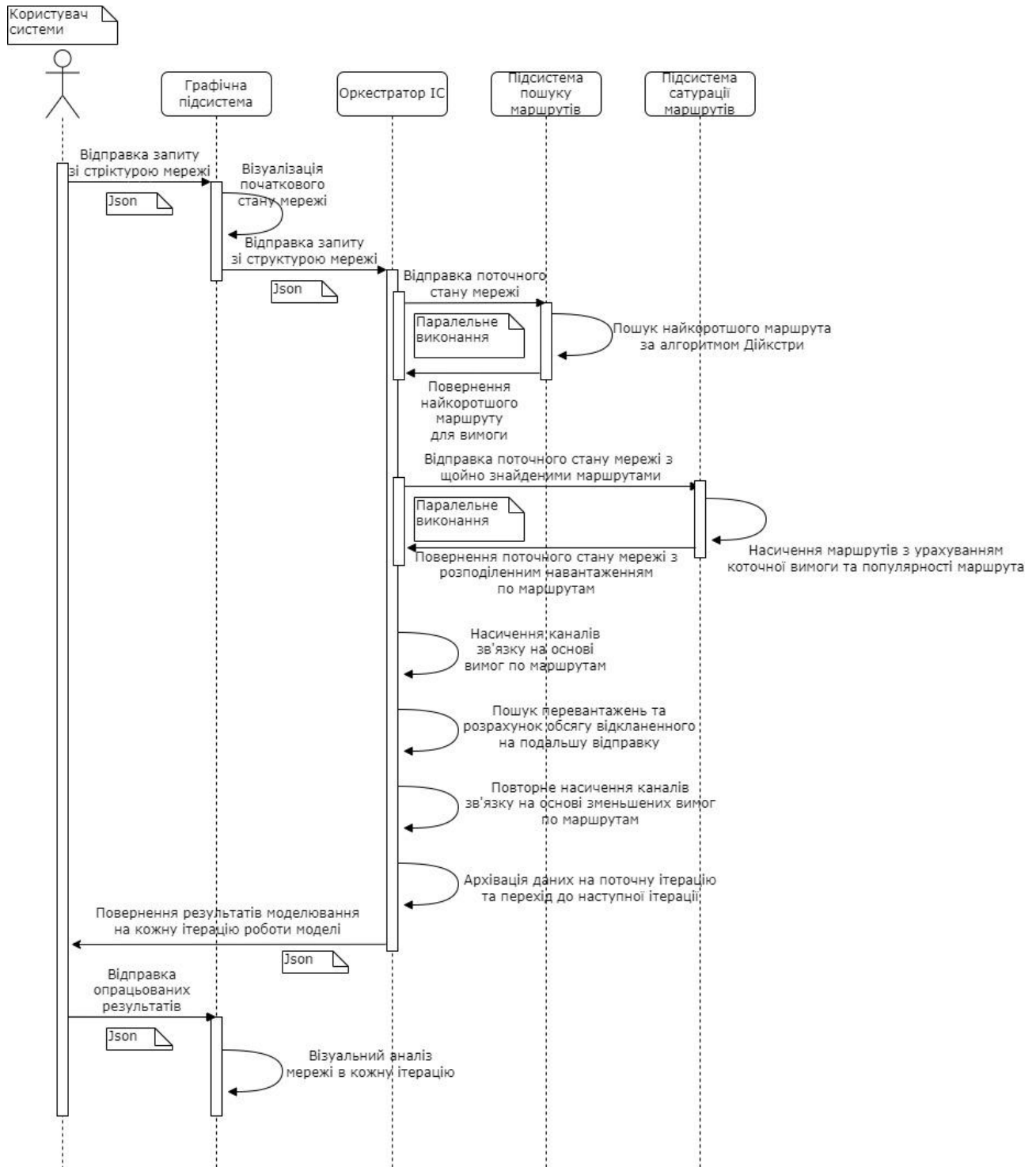


Рисунок 4.2 – Діаграма послідовності ІТІМ



Як видно з рисунків 4.1 та 4.2, ІТІМ функціонально розподілена на чотири головних підсистеми: оркестратор ІТ, графічна підсистема, підсистема пошуку маршрутів, підсистема насичення маршрутів.

Оркестратор ІТ є головним модулем ІТІМ і відповідає за отримання вхідних даних, їх трансформацію для роботи з даними, а також повернення структурованих результатів користувачу. Він оркеструє роботу з підсистемами обробки маршрутів, що дозволяє використовувати паралельні обчислення. В свою чергу такий підхід відкриває можливість максимально гнучко розподіляти навантаження на систему та масштабувати обчислювальні ресурси таким чином, щоб час моделювання великої комп'ютерної мережі зростав лінійно, а не експоненційно відносно часу моделювання малих та середніх мереж. Також Оркестратор відповідає за розрахунки, які не можуть бути делеговані підсистемам через неможливість паралельних розрахунків. А саме відбувається пошук місць перевантаження в мережі та розраховується обсяг даних, який не може бути переданий в межах поточної ітерації.

Графічна підсистема відповідає за візуальне представлення вхідних даних, а також дозволяє проводити візуальний аналіз результатів моделювання. Є додатковою та необов'язковою частиною даної ІТІМ, може бути розширена, або замінена повністю без суттєвого впливу на роботу інформаційної технології.

Підсистема пошуку маршрутів є функціональною частиною ІТІМ, яка шукає найкоротший маршрут для конкретного напрямку зв'язку в поточній мережі. Фактично ця підсистема є реалізацією алгоритму Дійкстри.

Підсистема сатурації (насичення) маршрутів є також функціональною частиною ІТІМ, яка розподіляє навантаження для конкретного напрямку зв'язку між усіма маршрутами, які утилізовані цим напрямком.

## 4.2 Програмна реалізація методу моделювання топології комп'ютерної мережі

Розроблене програмне забезпечення є мікросервісною системою, отже кожна з його підсистем може бути реалізована окремо з використанням різних технологій.

Окрестратор ITIM реалізований у вигляді Spring Boot Java додатку, та розгорнений у GCP Computing Engine клауді.

Підсистеми пошуку та сатурації маршрутів є Java додатками, які реалізують інтерфейси Google Cloud Function. Вони в свою чергу розгорнуті у вигляді лямбда функцій у GCP клауді.

Графічна підсистема була реалізована як легковісний JavaScript додаток з використанням географічних API.

Всі підсистеми були розгорнуті в рамках одного і того самого GCP клауд середовища для полегшення мережевої конфігурації інтеракцій між компонентами.

Технічні вимоги до розгортання продукту є гнучкими, як вже було зазначено вище. Поточна версія використовує Free Tier ліміти GCP для демонстраційних цілей, а саме:

- e2-micro VM інстанс — 2 vCPUs, 1GB RAM;
- 1.000.000 запитів для Google Cloud Function на місяць.

На рисунку 4.3 показаний початковий стан потенційної мережі. Темним (синім) кольором виділені вузли-маршрутизатори мережі, білим виділені канали зв'язку з вказаною максимальною пропускнуою здатністю.

На рисунку 4.4 наведений інструмент для візуального аналізу мережі. Вузли та канали зв'язку відмічені так, як і було на початковій схемі мережі, однак пропускна здатність була замінена на затримку на каналах зв'язку.

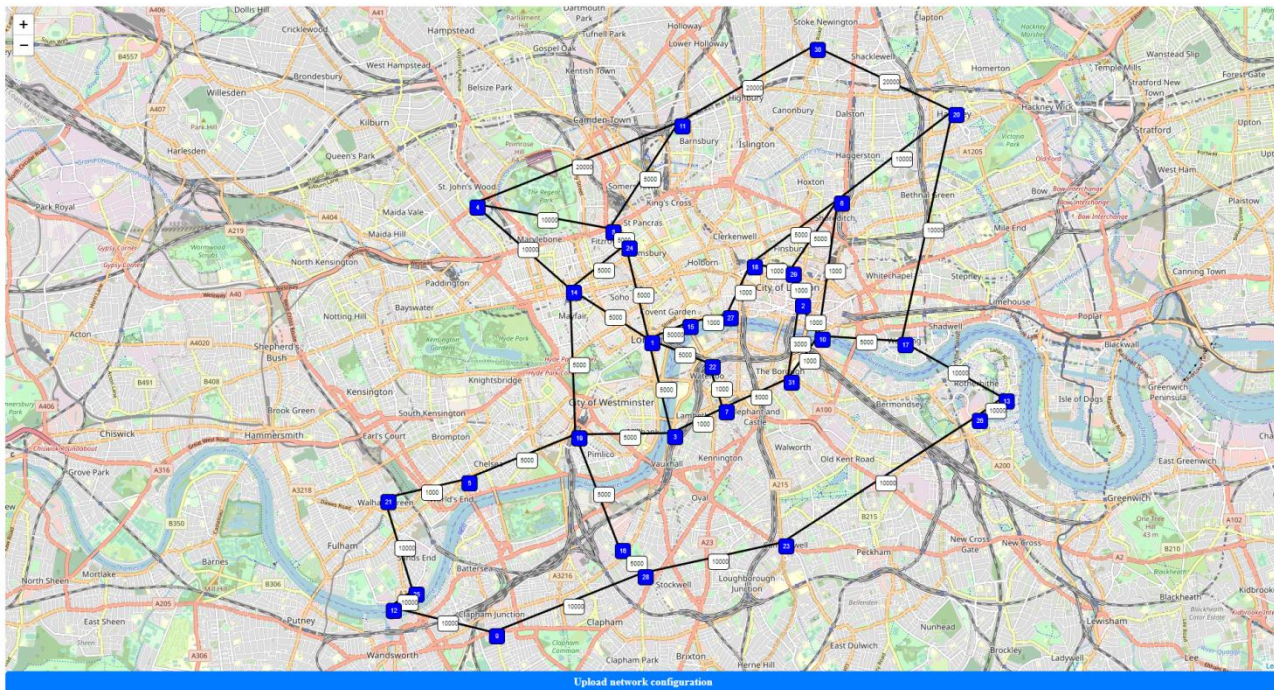


Рисунок 4.3 - Початковий стан потенційної мережі

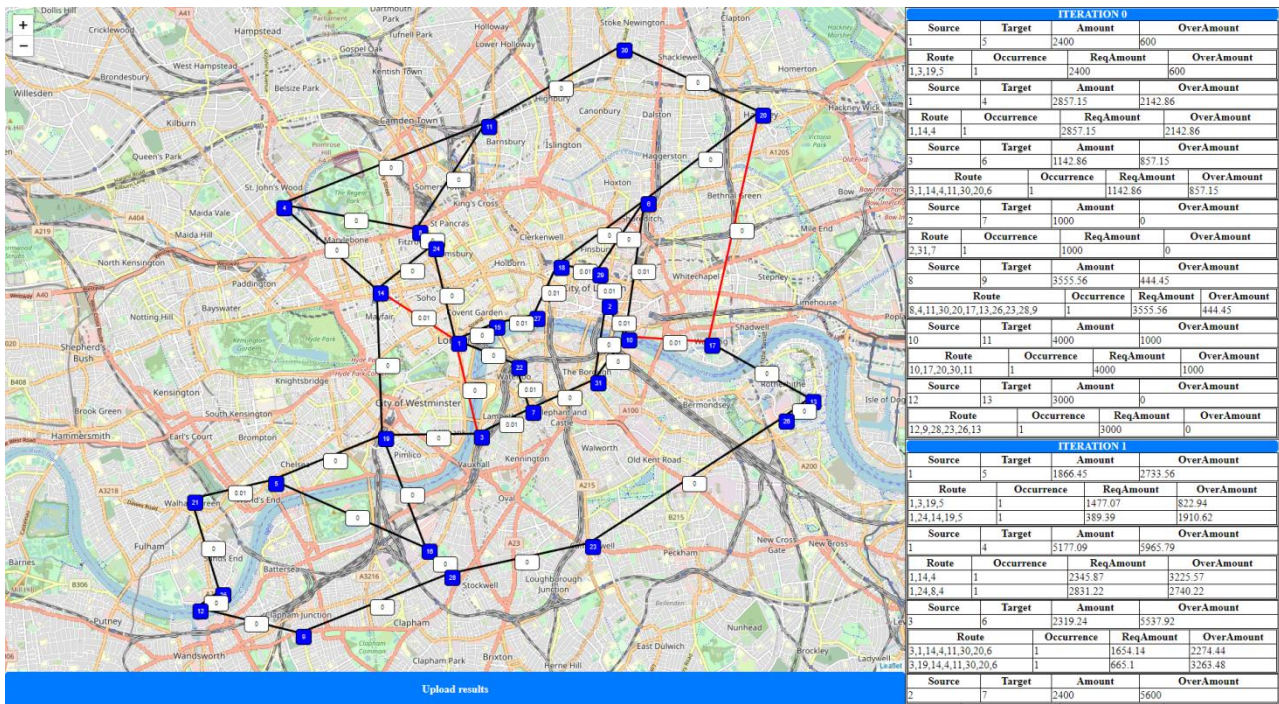


Рисунок 4.4 - Інструмент для візуального аналізу мережі

Праворуч є навігаційна панель з можливістю вибору конкретної ітерації моделювання. Навігаційна панель дає змогу отримати інформацію про такі параметри:

- вимоги на передачу даних (напрямок, обсяг, який може бути переданий та обсяг, який буде перенесено на наступну ітерацію);
- маршрути для вказаної вимоги на передачу даних (вузли маршруту, популярність маршруту, кількість даних для передачі цим маршрутом).

### **4.3 Приклад моделювання поведінки комп'ютерної мережі із застосуванням інформаційної технології**

Для розглядання прикладу буде використана штучна модель мережі з обмеженою кількістю вузлів та каналів зв'язку.

На рисунку 4.5 наведена початкова структура мережі, яка має бути змодельована.

Мережа буде складатись з шести маршрутизаторів та наступних каналів зв'язку:

- 0 => 1 – 10 Gbit/s
- 0 => 2 – 5 Gbit/s
- 0 => 2 – 7 Gbit/s
- 1 => 3 – 20 Gbit/s
- 2 => 4 – 20 Gbit/s
- 3 => 4 – 5 Gbit/s
- 3 => 5 – 7 Gbit/s
- 4 => 5 – 5 Gbit/s

Вимоги на передачу представлені у таблиці 4.х.

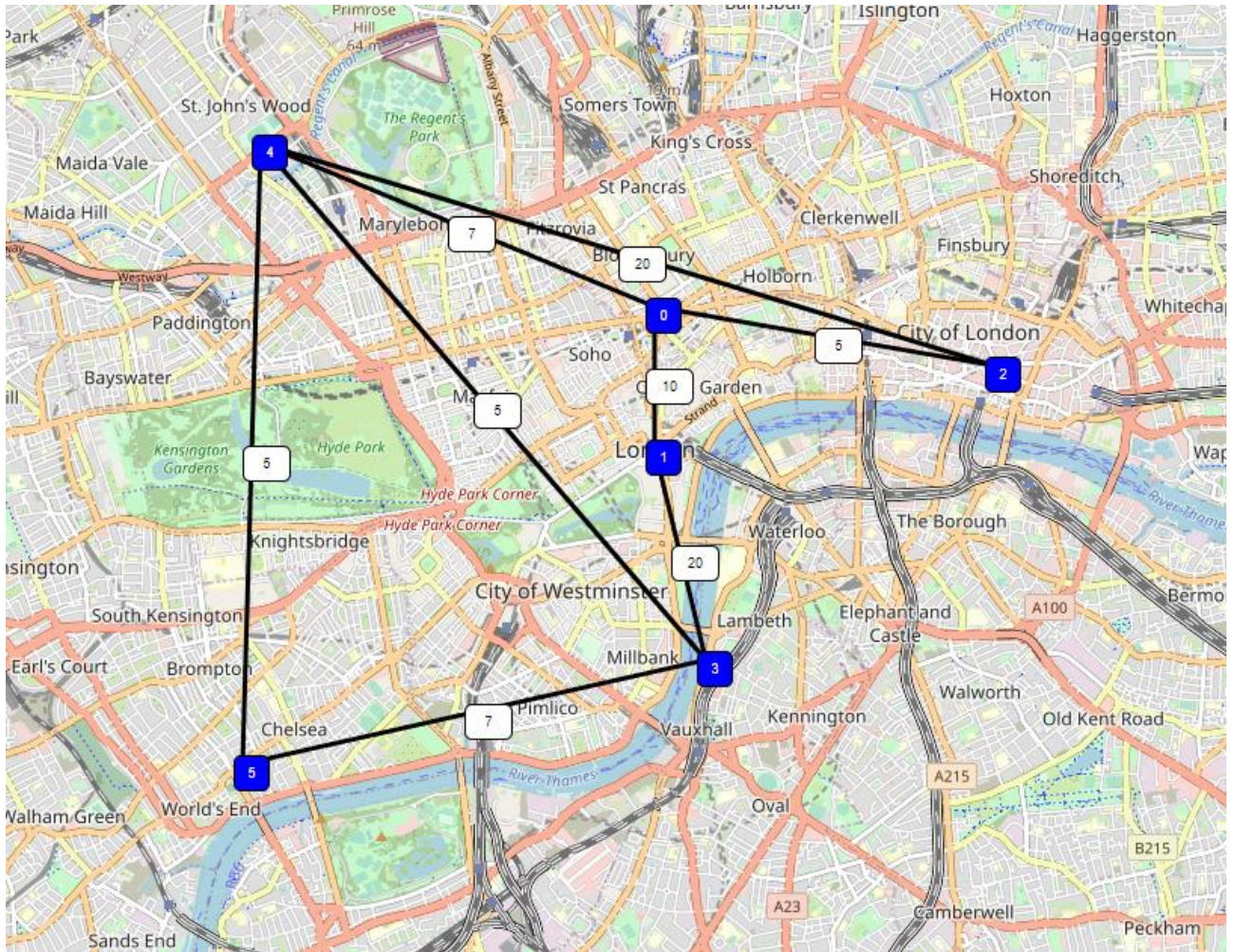


Рисунок 4.5 - Початкова структура мережі

Таблиця 4.1- Вимоги на передачу даних

Напрямок\Ітерація	1	2	3
0 => 5	5 Gbit	7 Gbit	15 Gbit
1 => 4	1 Gbit	3 Gbit	3 Gbit

Першим кроком роботи ІТІМ є пошук оптимальних маршрутів передачі інформації із застосуванням алгоритму Дійкстри. Перш ніж перейти до такого розрахунку пропускна здатність буде конвертована в затримку за формулою (3.1).

Після цього маршрути будуть додані до масиву запам'ятованих маршрутів і оскільки поточна ітерація є першою, то увесь обсяг даних буде

розподілений в щойно знайдені маршрути. Стан мережі після першої ітерації наведений на рисунку 4.6.

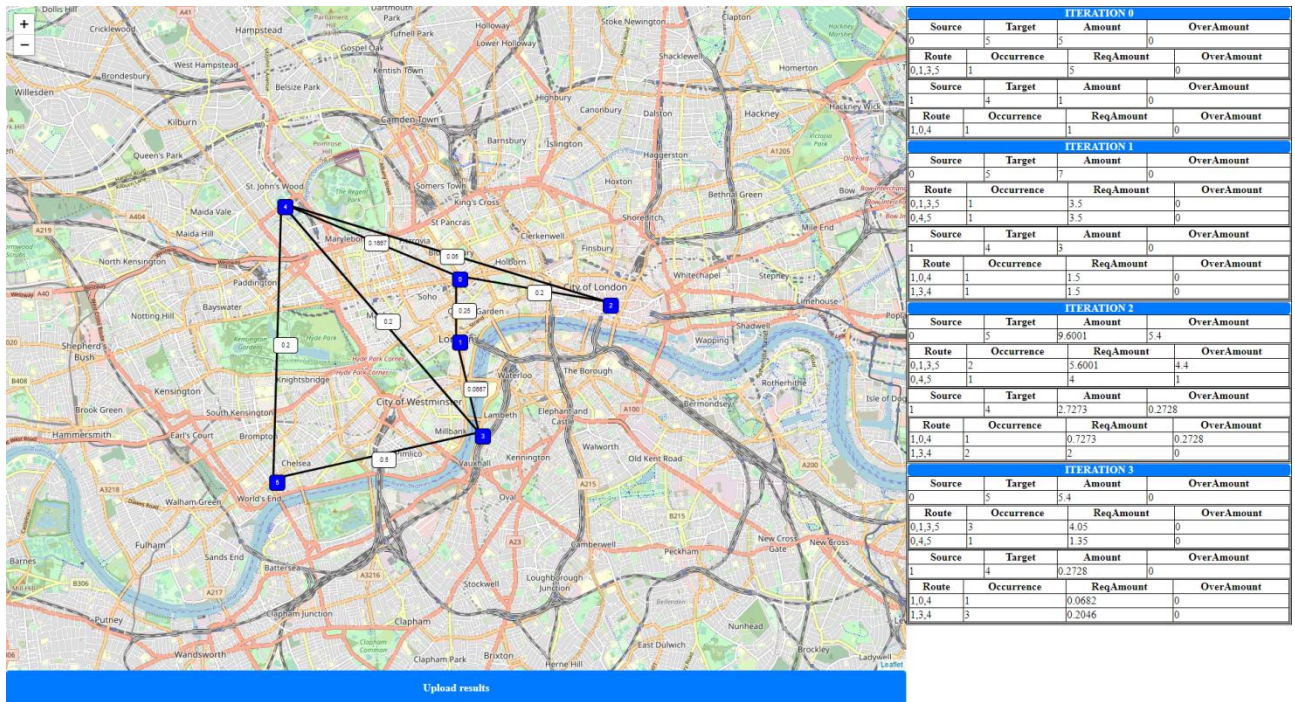


Рисунок 4.6 - Стан мережі після першої ітерації

Оптимальним маршрутом для напрямку  $0 \Rightarrow 5$  був знайдений маршрут 0-1-3-5, а для напрямку  $1 \Rightarrow 4$  відповідно 1-0-4.

Оскільки перевантажень не було виявлено, після розрахунку затримок було здійснено перехід до наступної ітерації. Її результат наведений на рисунку 4.7.

В рамках цієї ітерації було знайдено додаткові маршрути для кожного з напрямків. Для напрямку  $0 \Rightarrow 5$  був знайдений маршрут 0-4-5, а для напрямку  $1 \Rightarrow 4$  – 1-3-4.

Наступними кроками буде обчислити популярність та обсяг даних для кожного з маршрутів. Для цього будуть використані формули (3.2), (3.3) та відповідно.

Оскільки перевантажень не було і в рамках цієї ітерації, то робиться перехід на наступну.

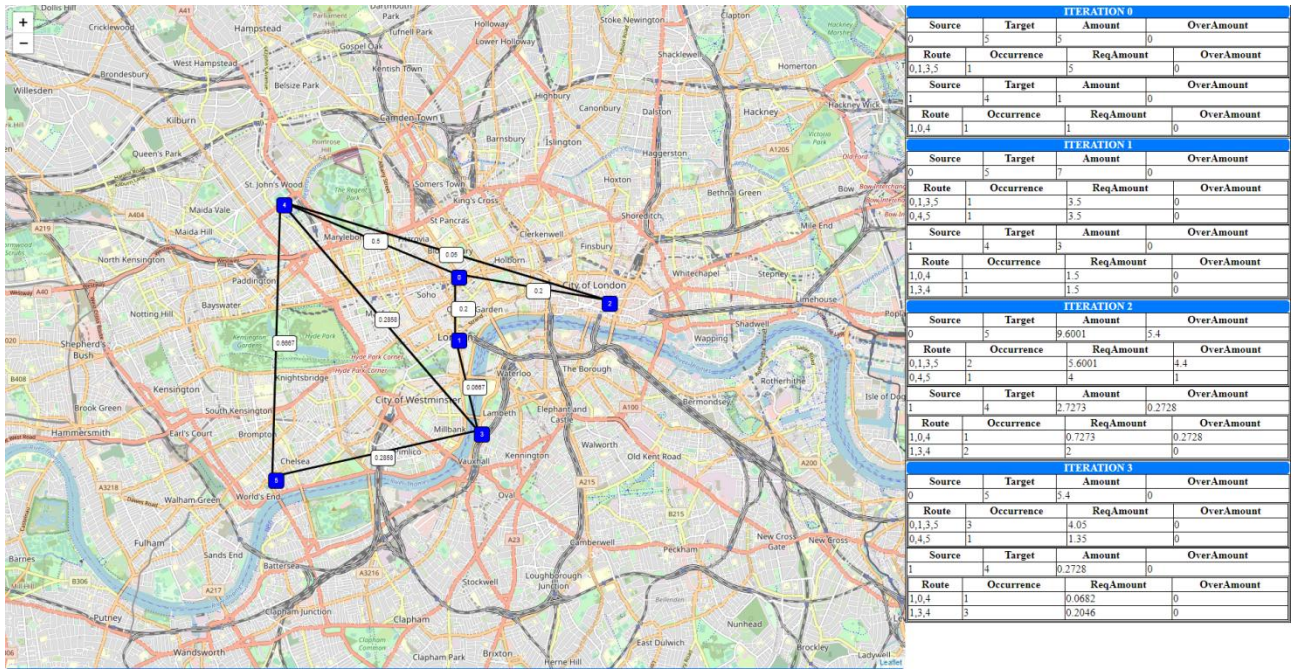


Рисунок 4.7 - Стан мережі після другої ітерації

Стан мережі після третьої ітерації наведений на рисунку 4.8.

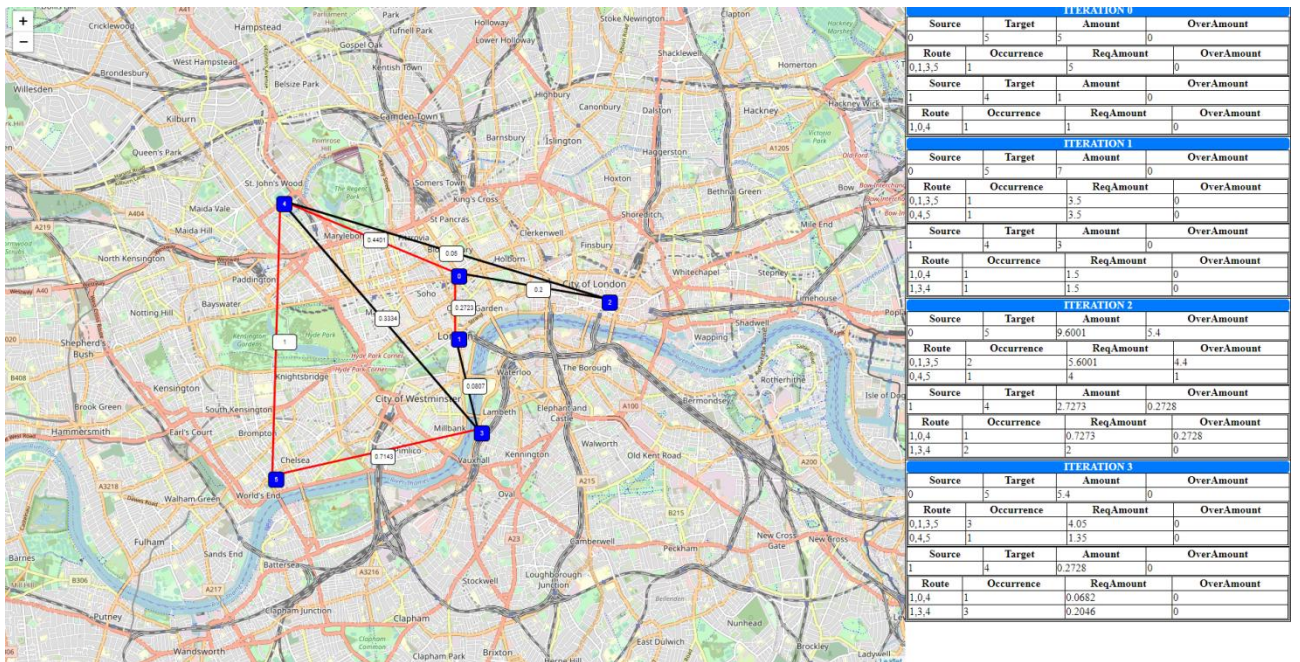


Рисунок 4.8 - Стан мережі після третьої ітерації

Першим кроком буде знаходження маршрутів, в даному випадку маршрути 0-1-3-5 для вимоги  $0 \Rightarrow 5$ , та маршрут 1-3-4 для вимоги  $1 \Rightarrow 4$  були знайдені знову.

Після розрахунку їх популярності та насичення їх даними, мережа стає перевантаженою. А саме канали 0-1, 0-4, 3-5, 4-5. Обсяг перевантаження на цих каналах був розрахований із застосуванням формули (3.4).

Далі модель вираховує максимальне перевантаження для кожного з маршрутів і робить відповідну корекцію (формули 3.5 - 3.7). В даному випадку мережа музитиме перенести обсяг даних у розмірі 5.4 Gbit для напрямку  $0 \Rightarrow 5$ , та 0.2728 Gbit для напрямку  $1 \Rightarrow 4$  на наступну ітерацію. Після чого здійснюється перехід до розрахунку останньої, додаткової ітерації. Її результат приведено на рисунку 4.9.

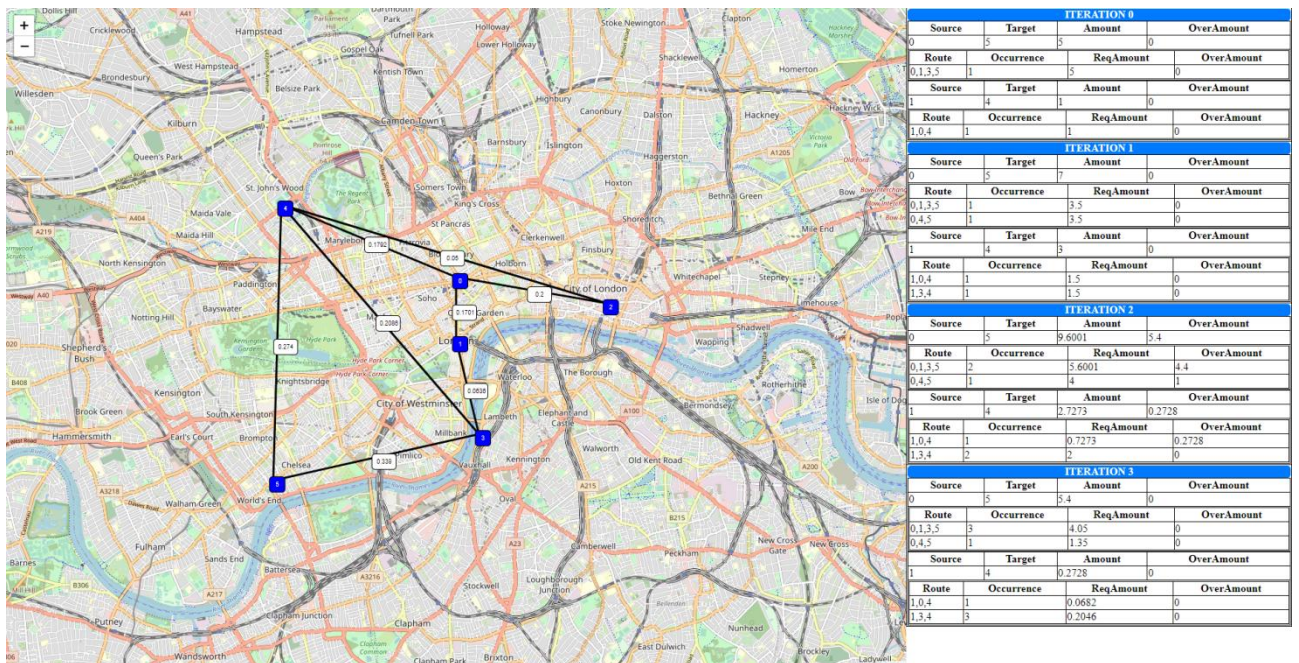


Рисунок 4.9 - Стан мережі після останньої ітерації

На рисунку видно, що мережа пододала перевантаження із лише однією додатковою ітерацією і подальші перевантаження відсутні.



## 4.4 Оптимізація структури мережі на основі отриманих результатів моделювання

Головним критерієм потреби в зміні структури мережі виступає відкладення вимог на наступні ітерації. Чим більше додаткових ітерацій буде створено, тим менше поточна структура мережі відповідає запланованим навантаженням.

Для прикладу візьмемо мережу з 30 вузлами і змодельюємо поведінку мережі на протязі  $n = 10$  ітерацій. На рисунку 4.10 приведено вигляд мережі після моделювання з суттєво перевищеними вимогами на передачу даних.

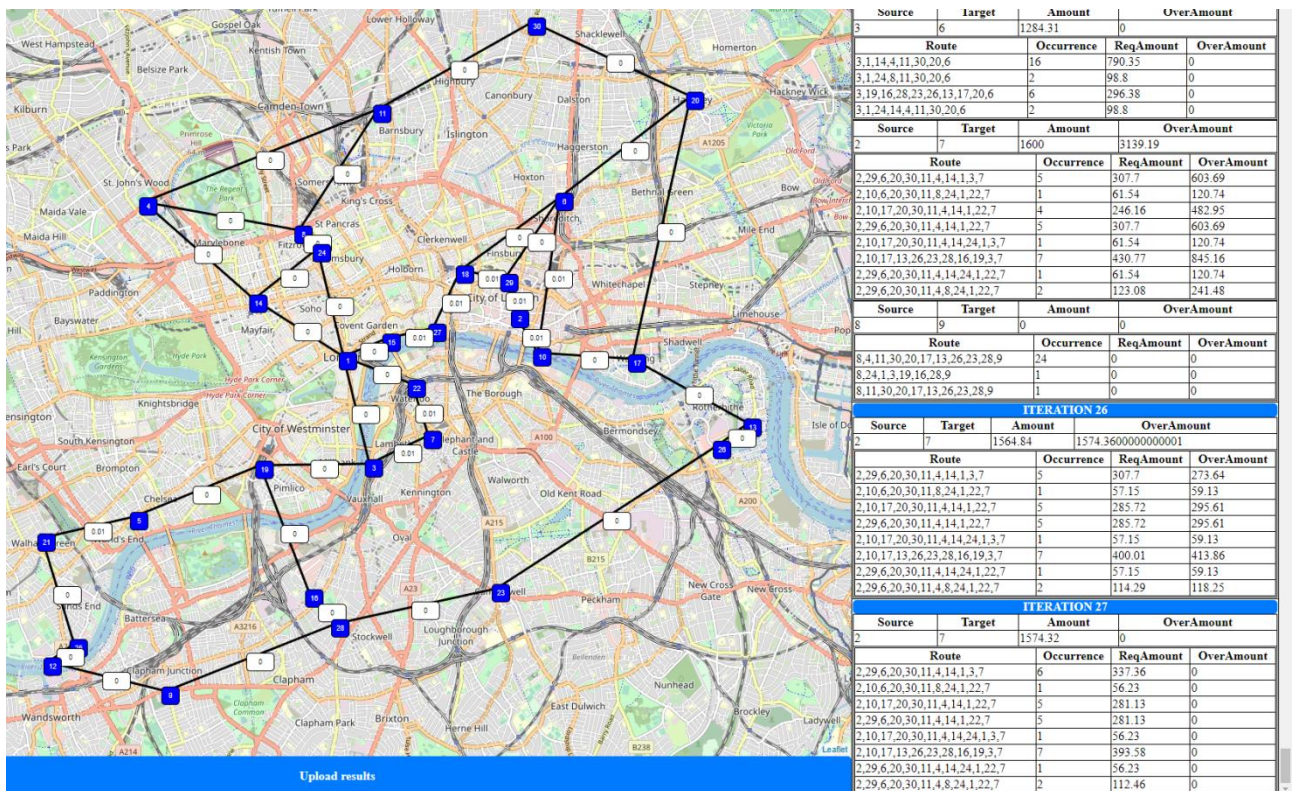


Рисунок 4.10 - Вигляд мережі після моделювання з суттєво перевищеними вимогами на передачу даних

Як видно з рисунка, кількість ітерацій, яка потрібна для повної передачі усіх вимог становить  $n' = 27$ . Однак початкова кількість ітерацій для вимог дорівнювала  $n = 10$ . Отже певні дані для їх повноцінного доставлення будуть

відкладені майже втричі, що не є раціональним з точки зору вимог Quality of Service.

Для оптимізації структури мережі першим етапом є виявлення так званих bottle-neck вузлів та каналів, які є найслабшими ланками в процесі передачі. Виявити такі канали можна проаналізувавши останні ітерації роботи моделі і звернувши увагу на вимоги передачі даних, які були відкладені найдовше.

З рисунку 4.10 видно, що останнім закінчилася передача даних для вимоги 2=>7. Тож почати оптимізацію мережі варто саме з маршрутів, утилізованих цією вимогою. У таблиці 4.2 наведений стан передачі для останніх шести ітерацій для вимоги 2=>7.

Таблиця 4.2 - Стан передачі даних для шести ітерацій

Iteration no.	Transferred amount	Delayed amount
22	1551.52	7898.16
23	1600	6298.17
24	1558.98	4739.1900000000005
25	1600	3139.19
26	1564.84	1574.3600000000001
27	1574.32	0

Ця таблиця явно ілюструє, що кількість даних, яка може бути передана за цією вимогою лімітована 1600 Мб/с. З останньої перевантаженої ітерації видно, які саме канали зв'язку не можуть передати потрібну кількість інформації за вимогою (рис.4.11). Ці канали зв'язку є кандидатами на модернізацію.

Запропонованою модифікацією буде додавання додаткового вузла маршрутизатора №31 для з'єднання між собою вузлів 2-31 з пропускною здатністю 3Гб/с, 7-31 з пропускною здатністю 2 Гб/с та 10-31, з пропускною здатністю 2 Гб/с. Після повторного моделювання видно, що bottleneck в 1600 Мб/с був покращений в середньому до максимальної пропускної здатності в 1800-1900 Мб/с. Кількість ітерацій зменшилася з 27 до 25, що все ще є надзвичайно великим перевантаженням для поточної мережі.

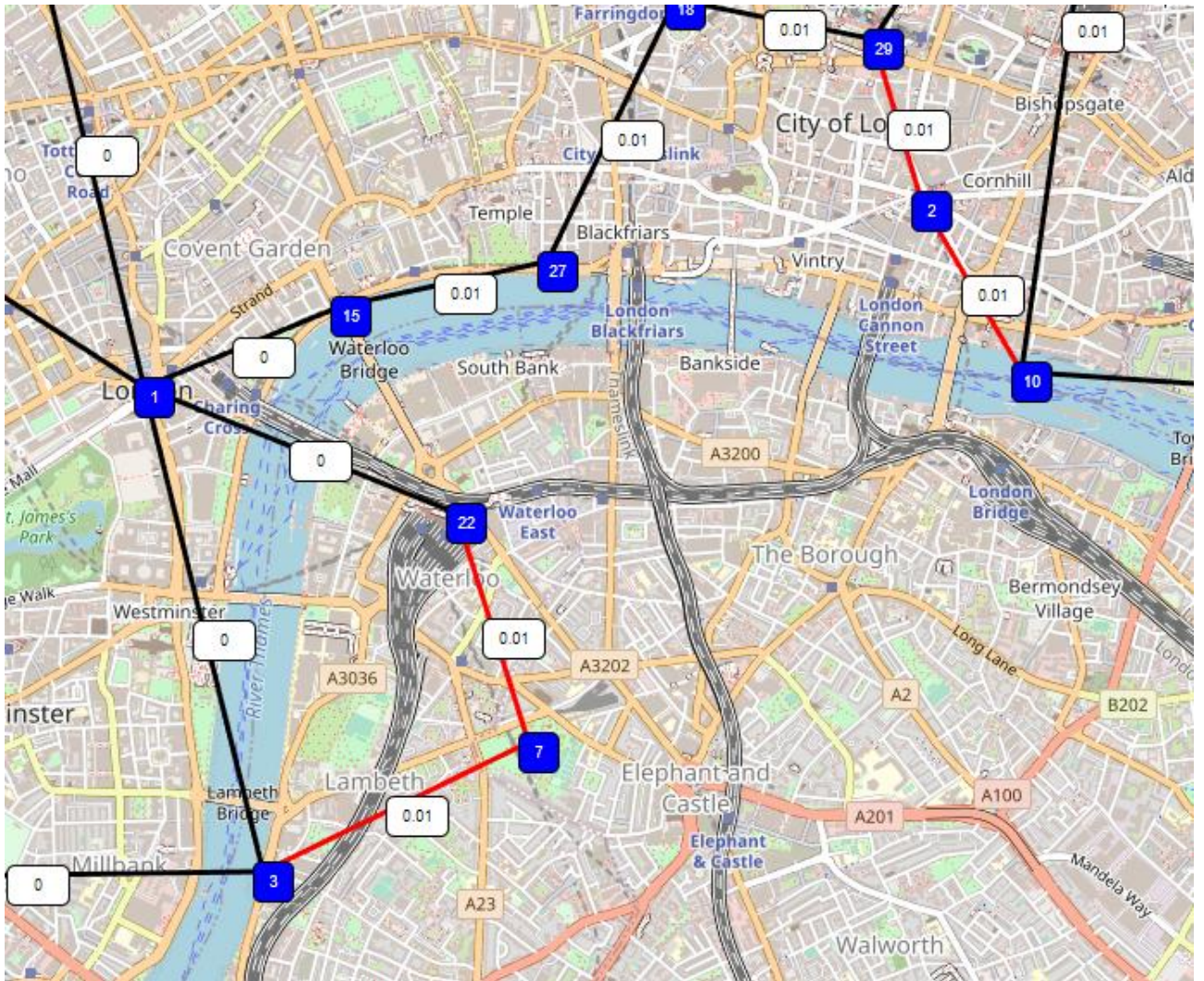


Рисунок 4.11 – Характеристики мережі до модифікації

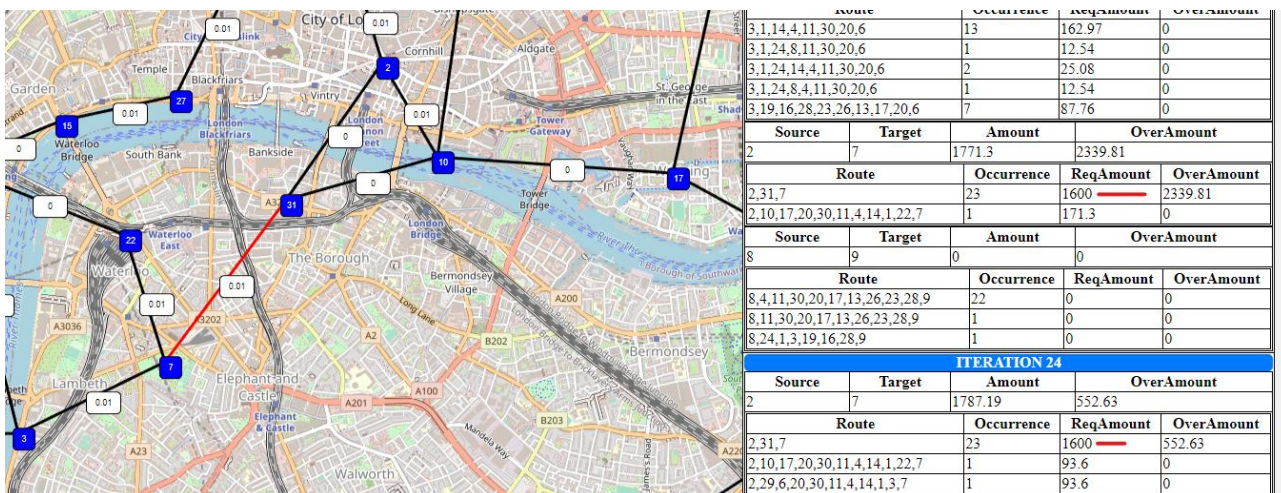


Рисунок 4.12 – Характеристики мережі після першої модифікації

Незважаючи на загальне покращення вимоги  $2 \Rightarrow 7$ , головний маршрут передачі 2-31-7, все ще не дає змоги передавати більше 1600 Мб/с, тож ватро розглянути збільшення пропускної здатності каналу 7-31.

Збільшення пропускної здатності для каналу 7-31 до 5 Гб/с показало суттєве покращення передачі, однак повторне моделювання також показало що це є надлишковим збільшенням пропускної здатності і майже половина каналу не буде утилізована, тож варто зупинитись на каналі 7-31 з ПЗ в 3Гб/с.

Поточна мережа може впоратись з вимогами за 23 ітерації замість 27.

Подальша оптимізація може бути сконцентрована на інших вимогах, які тепер є найбільш перевантаженими, а саме вимозі  $1 \Rightarrow 5$  та вимозі,  $3 \Rightarrow 6$ .

В результаті додавання каналу  $14 \Rightarrow 19$  з ПЗ у 5 Гб/с можна суттєво покращити стан мережі, а саме зменшити кількість ітерацій з 27 на початку оптимізації до 18 (рис. 4.13).

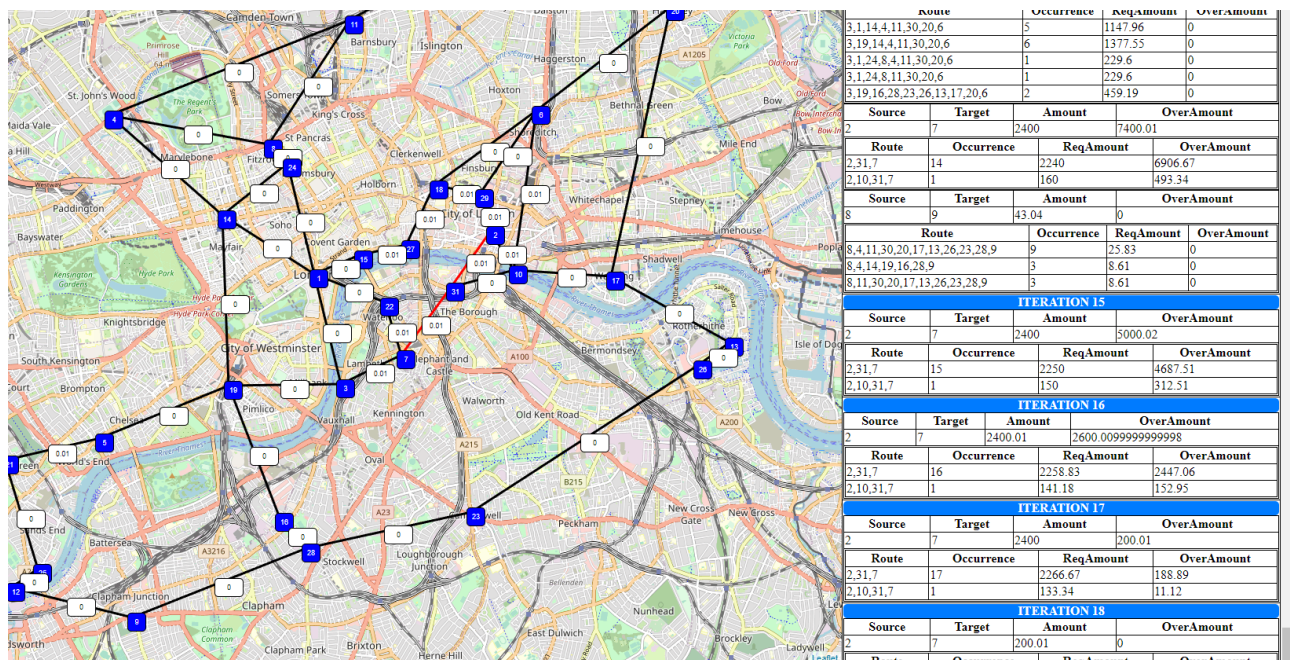


Рисунок 4.13 – Характеристики мережі після другої модифікації

Таким чином аналізуючи стан мережі з останніх ітерацій, можливо виявити «вузькі місця» мережі, де за додаванням одного, або декількох вузлів

та каналів зв'язку можна суттєво покращити стан мережі та забезпечити вимоги QoS.

#### **4.5 Висновки до розділу**

Сформована архітектура ІТІМ для моделювання поведінки комп'ютерної мережі на базі мікросервісів, з урахуванням потенційних можливостей для горизонтального масштабування аналітичних можливостей системи. При цьому забезпечена можливість додавання сторонніх зовнішніх, або внутрішніх модулів для розширення поведінкової структури моделі.

Розроблено та розгорнуто прикладну інформаційну технологію для моделювання стану комп'ютерної мережі на протязі певного часу із динамічним розподілом вимог на передачу даних.

Підтверджена адекватність розроблених в роботі моделей на базі практичних розрахунків тестового прикладу. Проведені розрахунки мережі, наближеної до реальної, як із валідними так і з надмірними вимогами на передачу даних.

Розглянуто процедуру модернізації мережі із застосуванням ІТІМ для моделювання поведінки мережі. Проведено адаптацію мережі за допомогою додавання нових вузлів комутаторів, а також каналів зв'язку. Розглянута можливість знаходження мінімально допустимого впливу на мережу для досягнення максимально можливого збільшення QoS, для економії часу та коштів під час модернізації комп'ютерної мережі.

Виділений напрям покращення моделі шляхом додавання окремого модулю, який пропонує можливі зміни з урахуванням мінімаксного підходу, де кількість змін прагне до нуля, а кількість відкладених запитів прагне до кількості початкових ітерацій.

Таким чином, сукупність запропонованих в роботі моделей була реалізована програмно і підтверджено адекватність отриманих результатів

моделювання. Але варто зазначити, що результати моделювання мають певні обмеження, оскільки не враховані конкретні специфікації обладнання (такі як, протоколи передачі, втрати при передачі, режими передачі даних, тощо), а лише географічні, топологічні особливості місцевості з мінімальним урахуванням потужностей каналів зв'язку.

В результаті набула подальшого розвитку прикладна інформаційна технологія моделювання комп'ютерної мережі шляхом створення імітаційної моделі дослідження її структури, що надає змогу оцінювати основні показники мережі для обґрунтування рішень щодо впровадження нових послуг. Практичною цінністю розробленої інформаційної технології є можливість спрогнозувати вузькі місця (bottlenecks) під час створення комп'ютерної мережі, або навпаки - вказати на надмірність певних рішень, щоб у перспективі зекономити значні кошти провайдерів та операторів послуг зв'язку.

Результати розділу опубліковано в роботах [4, 15, 16].

## ВИСНОВКИ

1. Розглянуто стан індустрії телекомунікацій на сьогоднішній день, а також проблеми, які виникають через безперервний розвиток та збільшення кількості мереж. Проаналізована зміна сервісів, які можуть бути надані операторами зв'язку, що в свою чергу тягне за собою необхідність зміни технічного забезпечення комп'ютерної мережі.

2. Розроблено метод прийняття рішень зі стратегічного управління процесами надання телекомунікаційних послуг, який враховує результати прогнозування обсягу вхідного потоку та моделювання структури комп'ютерної мережі. При цьому розглянуто основні характеристики ефективності комп'ютерної мережі. В результаті дослідження трафіку на схожість та самоподібність доведено його добову та сезонну періодичність. На основі спостережень було отримано тренд зростання обсягів трафіку, який може бути використаний для прогнозування максимальних навантажень комп'ютерної мережі в майбутні роки.

3. Запропоновано метод модернізації структури комп'ютерної мережі, що дозволяє перетворити існуючу структуру у квазіоднорідну, що суттєво підвищить її ефективність за рахунок збереження коштів на надлишкові канали зв'язку, та дозволить ефективніше використовувати наявні ресурси. Розроблено метод оцінки параметрів комп'ютерної мережі, оснований на моделюванні її функціонування з урахуванням динаміки зміни трафіку, що дозволить підвищити точність оцінки навантаження мережі.

4. Розроблено модель аналізу комп'ютерної мережі, яка імітує поведінку мережі на базі спостережень та алгоритмів роботи нижніх рівнів моделі OSI та на основі розрахункової моделі транспортного рівня у вигляді емуляції механізму «ковзаючого вікна» застосовується для моделювання перевантаження. При цьому вирішуються питання: чи буде стабільною структура комп'ютерної мережі, чи буде при цьому обладнання використовуватись з максимальним навантаженням та чи оператор не втратить прибуток.

5. Розроблено інформаційну технологію імітаційного моделювання комп'ютерної мережі та модернізації її структури, що надає змогу оптимізувати навантаження в мережі та підвищити якість телекомунікаційних послуг. Сукупність запропонованих методів та моделей була реалізована програмно, для підтвердження адекватості отриманих результатів моделювання, без урахування конкретних специфікацій обладнання.

6. Впроваджено результати дисертаційного дослідження в практику надання телекомунікаційних послуг та модернізації комп'ютерних мереж (ТОВ «НПК «ХОУМ-НЕТ», м.Київ).



## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Давидовський, Ю. К., Малєєва, О. В., Косенко, В. В. & Персіянова О. Ю. (2018). Моделювання процесів перерозподілу трафіка в мережах передачі даних. *Математичні моделі та новітні технології управління економічними та технічними системами*: монографія. За заг. ред В. О. Тимофєєва, І. В. Чумаченко, Харків: ФОП Панов А. М., 261 - 270. ISBN 978-617-7541-98-0
2. Рева, О. А., & Давидовський, Ю. К. (2018). Розробка методики модернізації топології мережі для отримання квазіоднорідної структури. *Радіоелектронні і комп'ютерні системи*, 0(2), 43-51. <https://doi.org/10.32620/reks.2018.2.05>
3. Давидовський, Ю., Рева, О., & Малєєва, О. (2018). Метод моделювання параметрів мережі передачі даних для її модернізації. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*, (4(6)), 15-22. <http://dx.doi.org/10.30837/2522-9818.2018.6.015>
4. Davydovskiy, Y., Reva, O., Artiukh, O., & Kosenko, V. (2019). Simulation of computer network load parameters over a given period of time. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*, (3 (9)), 72–80. <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2019.9.072>
5. Davydovskiy, Y., Reva, O., Malyeyeva, O., & Kosenko, V. (2020). Application of the sliding window mechanism in simulation of computer network loading parameters. *Сучасні інформаційні системи*, 4(1), 16–22. <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2020.1.03>
6. Malyeyeva, O., Kosenko, V., Davydovskiy, Y., & Boiev, D. (2020). Factor synergy analysis and merger strategy models in investigation of telecommunication operators' performance. *Сучасні інформаційні системи*, 4(2), 130–136. <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2020.2.19>

7. Smidovych, L., & Davydovskyi, Y. (2022). Processes of the telecom operator's information architecture transformation. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*, (1 (19), 47–54. <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2022.19.047>.
8. Malyeyeva, O., Davydovskyi, Y., & Kosenko V. (2019). Statistical analysis of data on the traffic intensity of Internet networks for the different periods of time. *Second International Workshop on Computer Modeling and Intelligent Systems (CMIS-2019)*, 897-910. ISSN 1613-0073. <https://ceur-ws.org/Vol-2353/paper71.pdf>
9. Малєєва, О. В., & Давидовський Ю.К. (2017, 12-13 жовтня). Алгоритм оптимізації топології графу в проектах модернізації інфокомунікаційної мережі. *VIII Міжнародна науково-практична конф. фахівців, магістрантів, аспірантів та науковців. «Управління проектами: проектний підхід в сучасному менеджменті»*, Одеса, 208 – 211.
10. Косенко, В. В. & Давидовський, Ю. К. (2017, 1-3 листопада). Математична модель закріплення прикладних завдань розподіленої системи по вузлах мережі. *Матеріали III міжнародної НТК. "Комп'ютерне моделювання та оптимізація складних систем". КМОСС-2017*, Дніпро, 68-71.
11. Рева, О.А., Смідович, Л.С., & Давидовський Ю.К. (2018, 3-8 вересня). Дворівнева маршрутизація в SIP мережах. *XXVIII Міжнародна конференція «Нові технології у машинобудуванні»*, Коблево – Харків, 63.
12. Давидовський, Ю. К. (2018, 14-16 листопада). Аналіз засобів симуляції і емуляції мереж передачі даних. *Всеукраїнська VI міжнародна науково-технічна конференція «Проблеми інформатизації»*, Черкаси – Баку – Бельсько-Бяла – Полтава, 31.
13. Смідович, Л. С., Рева, О. А., & Давидовський Ю. К. (2019, 3-8 вересня) Система дистанційного навчання з курсу системний аналіз. *XXIX*

- Міжнародна конференція «Нові технології у машинобудуванні», Коблево – Харків, 115.*
14. Малєєва, О. В., Давидовський, Ю. К., & Малєєва Ю. А. (2022, 13-16 вересня). Аналіз ефективності рішень з модернізації комп'ютерних мереж. *Міжнародна науково-практична конференція «Інтелектуальні інформаційні системи в управлінні проєктами та економіці в умовах воєнного стану», Коблево, 78-80.*
15. Рева, О. А., Давидовський Ю. К., Казимов Р. Р., Смідович Л. С., & Соколов А. В. (2019). *Комп'ютерна програма “Програма FossProtectControl для управління з'єднаннями захищених каналів”*. Свід. про реєстр. автор. права на твір № 89926. Зареєстр. в Міністерстві економічного розвитку і торгівлі України 19.06.2019.
16. Рева, О. А., Давидовський Ю. К., Казимов Р. Р., & Соколов А. В. *Комп'ютерна програма “Програма FossProtectAgent для робочого місця з захищеним каналом з'єднання”*. Свід. про реєстр. автор. права на твір № 89927. – Зареєстр. в Міністерстві економічного розвитку і торгівлі України 19.06.2019.
17. Орлов В. М. & Політова І. В. (2011, 22-23 вересня). Інструменти трансформаційних зрушень щодо повернення інвестицій у розвиток галузі. *Науково-практична конференція «Раціональне природокористування – важлива умова ноосферного розвитку України», Одеса: ІПРЕЕД НАН України, 202 – 204.*
18. Цундер, О. Е. (2016). Аналіз і перспективи розвитку конкурентоспроможності послуг телекомунікаційних операторів ІВ в Україні. *Вісник Хмельницького національного університету. Економічні науки, (1), 276-280.*
19. Яцкевич, І. В. (2010). *Організаційно-економічні форми взаємодії малого і великого підприємства в телекомунікаційній сфері: монографія, Одеса : ВМВ.*

20. Голь, В. Д., & Ірха, М. С. (2021). *Телекомунікаційні та інформаційні мережі*.
21. *Performansi Video on Demand (VOD) Pada Virtual Private Network (VPN) Menggunakan OpenVPN*. <https://worldwidescience.org/topicpages/v/video-on-demand+vod+services.html> (дата звернення: 10.01.2022)
22. Желдак, І. Л. (2014). Сучасний стан телекомунікаційної галузі в Україні. *Вісник ЧДТУ*, 4, 209 - 219.
23. Скибун, О. Ж. (2015). *Механізми державного управління в сфері телекомунікацій*: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. наук: спец. 25.00.02 – механізми державного управління, Національна академія державного управління при Президентові України. Київ.
24. Павлова, Н. О. (2020). *Конкурентоспроможність підприємства: оцінка рівня та напрями підвищення* (на прикладі ТОВ «МАСТЕР-АВІА»).
25. Воробієнко, С. П. (2009). Визначення складу показників конкурентоспроможності телекомунікаційних послуг. *Економіка: проблеми теорії та практики : збірник наукових праць*, 248, т. V, 1101 - 1109.
26. Дзюбинський, А. В. (2002). Конкуренція на ринку телекомунікацій. *Економіка і управління*, 1, 36 - 41.
27. Кораблінова, І. А. (2010). Шляхи удосконалення механізму управління конкурентоспроможністю операторів телекомунікацій у сучасних умовах. *Науковий вісник ОДЕУ. Всеукраїнська асоціація молодих науковців*, 23 (124).
28. Гільорме, Т. В. (2015). Модель обліку людського капіталу як основа превентивного антикризового управління. *Економіка: реалії часу*, 3 (19). <http://economics.opu.ua/files/archive/2015/n3.html> (дата звернення: 08.01.2019).
29. *Internet World Stats: Usage and Population Statistics*. <https://www.internetworldstats.com/stats.htm> (дата звернення: 07.01.2019).

30. Zhuang, Y., Cappos, J., Rappaport, T., & McGeer, R. (2013). *Future Internet Bandwidth Trends: An Investigation on Current and Future Disruptive Technologies*. Dept. Comput. Sci. Eng., Polytech. Inst. New York Univ., New York, NY, USA, Tech. Rep. TR-CSE-2013-0411/01/2013.
31. Lavrut, O. O. (2014). The quality control of information flows in the telecommunication system of critical use. *Systems of Arms and Military Equipment*, 4 (40), 89–93.
32. Toroshanko, Ya.I., Bulakovskaya, A.O., Vysochinenko, M.C., & Shmatko, V.S. (2014). Tasks of monitoring and analysis of parameters of telecommunication networks. *Telecommunication and Informative Technologies*, 3, 62–69.
33. Tarasov, D.V., Paramonov, A.I., & Kucheryavyi, A.E. (2010). Features of video traffic for the next generation communication networks. *Telecommunications and radio engineering*, 2, 37–43.
34. Луцків, А. М., & Бутинець, В. Ю. (2020, 25-26 листопада). Аналіз методів прогнозування трафіку у комп'ютерних мережах. *Матеріали ІХ Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій»*, Тернопіль, 40.
35. Cisco Visual Networking Index: Forecast and Trends, 2017–2022. <https://twiki.cern.ch/twiki/pub/HEPIX/TechwatchNetwork/HtwNetworkDocuments/white-paper-c11-741490.pdf> (дата звернення: 05.02.2020)
36. Bihun, N., Shyshatskyi, A., Bondar, O., Bogrieiev, S., Sova, O., Trotsko, O., & Nalapko, O. (2019). Analysis of the peculiarities of the communication organization in NATO countries. *Advanced Information Systems*, 3 (4), 39-44. DOI: 10.20998/2522-9052.2019.4.05
37. Cisco Visual Networking Index: Traffic Analysis. [https://www.cisco.com/c/en/us/td/docs/ios/solutions\\_docs/voip\\_solutions/TA\\_ISD.html](https://www.cisco.com/c/en/us/td/docs/ios/solutions_docs/voip_solutions/TA_ISD.html) (дата звернення: 07.02.2020)
38. Ericsson Mobility Report. <https://www.ericsson.com/en/reports-and-papers/mobility-report> (дата звернення: 07.02.2020)

39. *Ericsson Mobility Report: за 10 років мобільний трафік зріс у 300 разів*  
<https://www.ericsson.com/uk/press-releases/2021/11/ericsson-mobility-report-mobile-data-traffic-increased-almost-300-fold-over-10-years> (дата звернення: 07.02.2020)
40. *Mobile technology trends: traffic by application category.*  
<https://www.ericsson.com/en/mobility-report/mobile-traffic-by-application-category> (дата звернення: 07.02.2020)
41. Коваль, В. В. (2015). Соціально-економічна ефективність розвитку інноваційно-інвестиційної діяльності операторів телекомунікацій. *Вісник Волинського інституту економіки та менеджменту*, 13, 154 - 161.
42. Pevcin, P. (2018), The Analysis of the Implementation of municipal Cooperation and Merger Strategies: Case Study for Slovenia. *Economics and Culture*, 15(1), 15 - 21. doi: <https://doi.org/10.2478/jec-2018-0002>
43. Hong ,Y., Li, Z., & Wang, J. (2019, 20–22 September). Business Value of Telecom Operators' Big Data. *Journal of Physics: Conference Series, 1437, 2nd International Symposium on Big Data and Applied Statistics (ISBDAS2019) 2019, Dalian, China.* DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1437/1/012067>
44. Смолій, Д. А. (2019). *Дослідження можливостей IMS для надання нових послуг в інфокомунікаційних мережах при реалізації концепції FMC.*  
[https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/31219/1/Smoliy\\_magistr.pdf](https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/31219/1/Smoliy_magistr.pdf) (дата звернення: 04.04.2021)
45. Zhang, X., Du, Y., Li, Z., & Wang, Q. (2018). Analyzing the operational performance migration of telecom operators. *China Communications*, 15 (6), 139 - 157. DOI: 10.1109/CC.2018.8398511
46. Шостак, Л. В., Павлова, С. В. (2013). Розробка корпоративної стратегії операторів сфери телекомунікацій. *Ефективна економіка*, 4.  
<http://www.economy.nayka.com.ua/?op=1&z=1948> (дата звернення: 06.04.2021)

- 47.Максименко, І. Я., & Максименко, І. Я. (2018). Злиття та поглинання як інструмент інноваційного розвитку: стан та перспективи в Україні. *Економічний вісник Національного гірничого університету*, 2, 43-50.
- 48.*Statistics and market data on Technology & Telecommunications* (2020). <https://www.statista.com/markets/418/technology-telecommunications/> (дата звернення: 04.04.2021)
- 49.Гилка, У. Л. (2009). Особливості конкуренції на ринку послуг телекомунікацій. *Наукові записки Українського науково-дослідного інституту зв'язку*, 3, 11.
- 50.Хрустальова, В. В., & Кононенко, Є. В. (2019). Ринок послуг мобільного зв'язку України: тенденції та перспективи розвитку. *Інвестиції: практика та досвід*, (1), 37-41.
- 51.Wu, Y., Williamson, C. (2005). Impacts of data call characteristics on multi-service CDMA system capacity. *Performance Evaluation*, 62 (1-4), 83–99. Doi:[10.1016/j.peva.2005.07.011](https://doi.org/10.1016/j.peva.2005.07.011).
- 52.Косенко, В. В., & Лисенко, Е. В. (2015). Аналіз та математичне моделювання структури інформаційно-телекомунікаційної мережі. *Моделювання процесів в економіці та управлінні проектами з використанням нових інформаційних технологій*: монографія, за заг. ред В. О. Тимофєєва, І. В. Чумаченко, Х: ХНУРЕ, 215–227. ISBN 978-966-659-209-8
- 53.Gelenbe, E., & Mitrani, I. (2010). *Analysis and Synthesis of Computer Systems* (Vol. 4). World Scientific.
- 54.Зайченко, Ю. (2009). *Розробка моделей, алгоритмів та програмного комплексу для аналізу та оптимізації комп'ютерних мереж з технологією MPLS*. <http://mmsa.kpi.ua/publications/zaychenko-olena-yuriyivna-733> (дата звернення: 04.05.2021)
- 55.Кучук, Г. А., Стасєва, Я. Ю., & Болюбаш, О. О. (2006). Розрахунок навантаження мультисервісної мережі. *Системи озброєння і військова техніка*, 4 (8), 130–134.

56. Литвинов, А. Л. (2018). *Теорія систем масового обслуговування*: навч. посібник. Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова. ISBN 978-966-695-473-5
57. Pang, L. Y., Zhong, R. Y., Fang, J., & Huang, G. Q. (2015). Data-source interoperability service for heterogeneous information integration in ubiquitous enterprises. *Advanced Engineering Informatics*, 29(3), 549–561. Doi: [10.1016/j.aei.2015.04.007](https://doi.org/10.1016/j.aei.2015.04.007).
58. Грошев, А. С., Колтун Ю. М. (2022). Аналіз механізмів забезпечення гарантованої якості обслуговування в мультисервісних IP мережах. *Проблеми інформатизації : десята міжнародна науково-технічна конференція*, 102.
59. Штіммерман, А. М., Якимчук, Н. М., Сорокін, Д. В., & Торошанко, А. І. (2020). Управління мережним трафіком на основі диференційованих і інтегрованих послуг. *Телекомунікаційні та інформаційні технології*, 4, 60 - 68. DOI: 10.31673/2412-4338.2020.046068
60. Xi, N., Sun, C., Ma, J., & Shen, Y. (2015). Secure service composition with information flow control in service clouds. *Future Generation Computer Systems*, 49, 142–148. Doi: [10.1016/j.future.2014.12.009](https://doi.org/10.1016/j.future.2014.12.009).
61. Бендзак, С. (2015). Застосування методів оптимізації в імітаційному моделюванні для мережі передачі даних. *Магістерський науковий вісник*, 33, 60-64.
62. Дрововозов, В. І., Аль-Шаммарі, А. А., Толстікова, О. В., Водоп'янов, С. В., & Коцюр, А. Б. (2020). Наскрізна якість сервісу безпроводових мереж з міжрівневою взаємодією. *Проблеми інформатизації та управління*, 1(63), 11-17. DOI: <https://doi.org/10.18372/2073-4751.63.14994>
63. Agarwal, S., Kodialam, M., & Lakshman, T. V. (2013). Traffic engineering in software defined networks. *INFOCOM. 2013. Proceedings IEEE*, 2211-2219. DOI: 10.1109/INFOCOM.2013.6567024



- 64.Червенець, В. В. (2016). *Підвищення якості передачі потокового трафіку в мультисервісних мережах* : Doctoral dissertation. Львів: Нац. ун-т" Львів. політехніка".
- 65.Dolhyi, Y. (2020). Оцінка результатів моделювання передач даних по каналу з випадковим доступом. *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, 2 (12),157-168. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2020.12.157>
- 66.Косенко, В. В. & Кучук Н. Г. (2016). Взаємодія технічних і програмних засобів при управління розподілом трафіка. *Системи озброєння і військова техніка*, 3, 72-75.
- 67.Люєва, І. Д., Серга, Е. М., & Школьний, Є. П. (2019). *Методи теорії випадкових процесів*: навчальний посібник. Одеса: Одеський державний екологічний університет.
- 68.Неруш, В. Б., Курдеча В. В. (2012). *Імітаційне моделювання систем та процесів*, К.: НН ІТС НТУУ «КПІ».
- 69.Nevliudov, I., Tsybal, O., & Bronnikov A. (2018). Intelligent means in the system of managing manufacturing agent. *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, (1 (3)), 33-47. DOI:<https://doi.org/10.30837/2522-9818.2018.3.033>
- 70.Wilensky, U., & William, R. (2015). *An Introduction to Agent-Based Modeling*, MIT Press.
- 71.Ducard, G. *Modeling and Analysis of Dynamic Systems*. [https://www.ethz.ch/content/dam/ethz/special-interest/mavt/dynamic-systems-n-control/idsc-dam/Lectures/System-Modeling/Slides\\_HS17/SysMod2017\\_Lect1.pdf](https://www.ethz.ch/content/dam/ethz/special-interest/mavt/dynamic-systems-n-control/idsc-dam/Lectures/System-Modeling/Slides_HS17/SysMod2017_Lect1.pdf) (дата звернення: 01.05.2021)
- 72.Verzun, N., Kolbanev, M., & Shamin, A. (2020). The architecture of the access protocols of the global infocommunication resources. *Computers*, 9(2), 49. DOI: 10.3390/computers9020049
- 73.Yang, P., Luo, W., Xu, L., Deogun, J. & Lu, Y. (2011) TCP Congestion Avoidance Algorithm Identification. *31st International Conference on*

- Distributed Computing Systems*, Minneapolis, MN, USA, 310-321.  
DOI: 10.1109/ICDCS.2011.27
- 74.Sadouni, S., Benslama, M. & Beylot, A. (2016). SCTP-manet new extension of SCTP protocol for the optimization of manet performances. *International Journal of Wireless & Mobile Networks (IJWMN)*, 8 (5), 53 – 66.
- 75.Zhuk, P.V. (2011). Analysis of Data Flow Management Methods in Mobile Radio Networks (MANET). *Proceedings of the Military Institute of Taras Shevchenko National University of Kyiv*. No. 33. pp.145 – 155.
- 76.Сова, О., Нерознак, Є., Налапко, О., Кондрусь, А., & Шишацький, А. (2022). Аналіз підходів управління потоками даних в військових системах радіозв'язку. *Collection of scientific papers «SCIENTIA»*, (August 19, 2022; Tel Aviv, Israel), 79-84.
- 77.Larsen, E. (2012, 27 September). TCP in MANETs – challenges and Solutions. *Norwegian Defence Research Establishment (FFI)*, 57.
- 78.Drieieva, Н. (2022). Метод імітаційного моделювання трафіку комп'ютерної мережі з фрактальними властивостями. *Системи управління, навігації та зв'язку*. Збірник наукових праць, 4(70), 75-78.  
DOI: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2022.4.075>
- 79.Taradaev, S., Bokhan, K. (2012). An analysis of properties of self-similarity of traffic is in network of Asterisk. *Information Processing Systems*, 2(100), 222-227.
- 80.Корнієнко, В., Герасіна, О., Сафаров, О., & Ковальова, Ю. (2021). Оцінювання характеристик самоподібного трафіку інформаційно-комунікаційних мереж для систем виявлення атак. *Information Technology: Computer Science, Software Engineering and Cyber Security*, 1, 8-15. DOI: <https://doi.org/10.32782/IT/2021-1-2>
- 81.Лемешко, О. В., Єременко, О. С., & Невзорова, О. С. (2020). *Роль і місце маршрутизації в сучасних інфокомунікаційних мережах*: монографія.

82. Parfenov, Yu. E.: (2011). The choice of a mathematical device in the development of simulation models of information systems. *Processing Systems Information*, 3(93), 69–72
83. Bunimovich, L., Smith, D., & Webb, B. (2018). Specialization Models of Network Growth. *Journal of Complex Networks*, 7(3). doi: 10.1093/comnet/cny024
84. Mestres, A., Alarcon, E., Ji, Y., & Cabellos-Aparicio, A. (2018, August). Understanding the Modeling of Computer Network Delays using Neural Networks. *Big-DAMA '18: Proceedings of the 2018 Workshop on Big Data Analytics and Machine Learning for Data Communication Networks*, 46 – 52. doi: 10.1145/3229607.3229613
85. Kosenko, V. (2017). Principles and structure of the methodology of risk-adaptive management of parameters of information and telecommunication networks of critical application systems. *Innovative technologies and scientific solutions for industries*, 1 (1), 45–51. doi: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2017.1.046>
86. Мацуєва, К. А. (2015). Моделювання динамічного розподілення навантаження в інформаційній системі на базі хмарних обчислень. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси*, 22, 28-31.
87. Прокопець, Н. А., & Глоба, Л. С. (2022). Математичне моделювання процесу обслуговування навантаження в інформаційно-комунікаційній мережі. *Проблеми телекомунікацій*, (1 (30)), 18-31.
88. Lavrut, O., & Blazhko, L. (2011). Mathematical modeling of the functioning of the fragment of the mobile component of the communications system of the Armed Forces of Ukraine. *Processing Systems Information*, 8 (98), 170–174.
89. Ткачов, В. М., Коваленко, А. А., Кучук, Г. А., & Ні, Я. С. (2021). Метод забезпечення живучості високомобільної комп'ютерної мережі. *Сучасні інформаційні системи*, 5(2), 159 – 165. DOI: 10.20998/2522-9052.2021.2.24

- 90.Зуб, Т. А., & Зозульов, О. В. (2013). Просування послуг за допомогою засобів телекомунікації. *Актуальні проблеми економіки та управління*, 1(7).
- 91.Бойко, Т. Л. (2014). Інтелектуальні ресурси телекомунікаційних підприємств. *Економіст*, 9, 47–50.
- 92.Довгий, С. О., Воробієнко, П. П., & Гуляєв, К. Д. (2013). *Сучасні телекомунікації: Мережі, технології, безпека, економіка, регулювання*. Видання друге (доповнене). К.:«Азимут-Україна»
- 93.Одарченко, Р. С., & Лукін, С. Ю. (2012). Економічна ефективність впровадження систем захисту стільникових мереж 4G. *Системи обробки інформації*, (4 (2)), 51-55.
- 94.Бриндзій, О. В., & Крикун, В. С. (2010). Методика оцінки швидкісного потенціалу з'єднань ADSL2+ для надання послуг Triple Play Service. *Східно-Європейський журнал передових технологій*, 2(2 (44)), 58-62.
- 95.СОУ 61–34620942–011:2012 «Телекомунікаційні мережі передачі даних загального користування. Телекомунікаційні послуги. Основні показники якості. Методи випробування», Київ: Адміністрація Державної служби спеціального зв'язку та захисту інформації України.  
<https://www.cip.gov.ua/ua/news/sou-61-34620942-011-2012-telekomunikaciini-merezhi-peredachi-danikh-zagalnogo-koristuvannya-telekomunikaciini-poslugi-osnovni-pokazniki-yakosti-metodi-viprobuvannya>  
(дата звернення: 05.05.2022)
96. Грибик, І., Коваль, С., & Мирош, Ю. (2022). Аналіз якості надання послуг операторами рухомого зв'язку. *Наукові перспективи*, (4 (22)). DOI: [https://doi.org/10.52058/2708-7530-2022-4\(22\)-132-144](https://doi.org/10.52058/2708-7530-2022-4(22)-132-144)
- 97.Філон, М. М. (2014). Концептуальні основи механізму державного регулювання конкуренції на ринку телекомунікаційних послуг. *Інвестиції практика та досвід*, 3, 90–94.

98. Вимоги до сучасних IP-мереж [https://wiki.cuspu.edu.ua/index.php/Вимоги\\_до\\_сучасних\\_IP-мереж](https://wiki.cuspu.edu.ua/index.php/Вимоги_до_сучасних_IP-мереж) (дата звернення: 08.06.2018)
99. Яворський, М. В., Голубничий, Д. Ю., Овчинников, С. В., & Колесник, С. М. (2019). Метод оцінки пропускнуої здатності в інформаційно-телекомунікаційній мережі Повітряних Сил Збройних Сил України при організації передачі даних. *Збірник наукових праць Харківського національного університету Повітряних Сил*, (1), 58-64. DOI: 10.30748/zhups.2019.59.08
100. DE-CIX Frankfurt statistics. <https://www.decix.net/en/locations/germany/frankfurt/statistics> (дата звернення: 10.02.2019)
101. DE-CIX New York statistics. <https://www.de-cix.net/en/locations/united-states/new-york/statistics> (дата звернення: 10.02.2019)
102. UI-EX. Ukrainian Internet Exchange. Statistics. <https://www.ix.net.ua/pro-kompaniyu/statystyka> (дата звернення: 10.02.2019)
103. Mozhaiev, M., Kuchuk, N., & Usatenko, M. (2019). The method of jitter determining in the telecommunication network of a computer system on a special software platform. *Innovative technologies and scientific solutions for industries*, 2019, 4 (10), 134-140. doi: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2019.10.134>
104. Poshtarenko, V.M., Andreev, A.Yu., & Amal, M. (2013). Ensuring the quality of service at critical sites of the multiservice network. *Bulletin of the NTU "KhPI"*, 60, 94–100.
105. Sultanov, A.Kh., & Sultanov, R.R. (2009). Method of assessing the quality of service indicators of hierarchical multiservice networks. *Bulletin USATU*, 12, 1 (30), 175–181.
106. Blake, A. P. , & Kapetanios, G. (2003). Pure Significance Tests of the Unit Root Hypothesis Against Nonlinear Alternatives. *Journal of Time Series Analysis*, 24(3), P. 253–267.

107. Anatolyev, S. A., & Gerko A. (2005). Trading Approach to Testing for Predictability. *Journal of Business & Economic Statistics*, 23, 455–461.
108. Шабліна, Я. В., & Гончаров, Ю. В. (2012). Злиття і поглинання в Україні. *Актуальні проблеми економіки*, (1), 120-128.
109. Shostak, L. V., & Pavlova, S. V. (2013). Development of corporate strategy of telecommunications operators. *Efficient economy*, 4.
110. Лещук, Г. В. (2017). Інвестиційна привабливість як домінанта розвитку інфраструктури регіону. *Науковий вісник Херсонського державного університету. Сер.: Економічні науки*, (23 (2)), 144-147.
111. Філон, М. М. (2012). Дослідження факторів впливу на функціонування структури сфери телекомунікацій. *Проблеми системного підходу в економіці : зб. наук. пр.*, 41, 163–170.
112. Ткаліч, О. П., Одарченко, Р. С., Рибальченко, Є. В., Марченко, О. В., Шеремет, & Є. Ю., Лагодний О. В. (2013), Підвищення ефективності використання корпоративної мережі за концепцією BYOD. *Проблеми створення, випробування, застосування та експлуатації складних інформаційних систем*, 7, С. 77-87.
113. Коваль, В. В. (2013), Посилення мережевим ефектом синергії консолідації суб'єктів ринку інфокомунікацій. *Економічні інновації*, 55, 61-72.
114. *Visual Networking Index: Global Mobile Data Traffic Forecast Update, 2016-2021*. Cisco Mobile VNI. CISCO. <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/mobile-white-paper-c11-520862.html> (дата звернення 18.12.2017).
115. Akhter, J., & Amin M. R. (2016). Traffic Modelling of Low Dense Femtocellular Network. *9th International Conference on Electrical and Computer Engineering*, 74 – 77.

116. Luqman, G., & Luqman, A. (2016). Modelling and Simulation of Load Balancing in Computer Network. *American Journal of Engineering Research (AJER)*,5(1), 111 – 117.
117. Рева, А. А., & Некрасов А. Б. (2004). Генерація предельно плоского графа мінімального вага на основі взвешеного неорієнтованого графа Керні. *Авіаційно-космічна техніка і технологія*, 3 (11),79 – 82.
118. Некрасов, А. Б. (2004). Оптимізація алгоритма генерації предельно плоского графа мінімального вага. *Радіоелектронні і комп'ютерні системи*, 4 (8), 71 – 74.
119. Wilensky, U., & William, R. (2015). *An Introduction to Agent-Based Modeling*. MIT Press.
120. Кліменко, О. А., Пархоменко, Д. О., & Щенякін, О. В. (2021). Метод побудови on/off моделі магістрального трафіка мультисервісної мережі. *Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України*, (4 (45)), 111-115.
121. Математичні основи теорії телекомунікаційних систем. (2006). За загал. ред. В. В. Поповського. Харків : ТОВ "Компанія СМІТ". ISBN 966-8530-60-8
122. Bhatti, S. Channel capacity. *Lecture notes for M.Sc. Data Communication Networks and Distributed Systems D51 - Basic Communications and Networks*. <https://web.archive.org/web/20070821212637/http://www.cs.ucl.ac.uk:80/staff/S.Bhatti/D51-notes/node31.html> (дата звернення 12.01.2018).
123. Shaw, K. *The OSI model explained: How to understand (and remember) the 7 layer network model*. <https://www.networkworld.com/article/3239677/lan-wan/the-osi-model-explained-how-to-understand-and-remember-the-7-layer-network-model.html> (дата звернення at 03.12.2018)
124. Kosenko, V., Persiyanova, E., Belotskyu, O., Maleyeva, O. (2017), *Methods of managing traffic distribution in infjhmation and communication*

networks of critical infrastructure systems, *Advanced Information Systems*, 2(2), 48 - 55. DOI: 10.30837/2522-9818.2017.2.048

125. Yamasaki, Y., Shimonishi, H., Murase, T. (2005). Statistical estimation of TCP packet loss rate from sampled ACK packets. *GLOBECOM '05. IEEE Global Telecommunications Conference*, 1, 5 – 12. doi: 10.1109/GLOCOM.2005.1577633.
126. Svyrydov, A. S. (2018) Method of growth of data transmission reliability time of use of TCP freeze protocol by increase transmission capacity. *Control, Navigation and Communication Systems*, 3(49), 135-138. Doi: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2018.3.135>.
127. (2019). *CiscoTips*. <http://ciscotips.ru/ссна1-3> (дата звернення at 27.01.2018)



## ДОДАТОК А.

## Документи впровадження основних результатів дисертаційної роботи

ЗАТВЕРДЖУЮ

Проректор з наукової роботи  
 Національного аерокосмічного  
 університету ім. М.С. Жуковського  
 д.т.н., професор

Володимир ПАВЛІКОВ

« 07 вересня 2023 »

АКТ

впровадження результатів наукових досліджень  
 Давидовського Юрія Костянтиновича  
 в навчальний процес

Комісія у складі: голови – завідувача кафедри комп'ютерних наук та інформаційних технологій Федоровича О.Є. та членів комісії: голови навчально-методичної комісії факультету Систем управління літальних апаратів, к.т.н., доцента кафедри інтелектуальних вимірювальних систем та інженерії якості Анікіна А.М., д.т.н., професора кафедри комп'ютерних наук та інформаційних технологій Прохорова О.В. встановила, що результати дисертації на здобуття ступеню доктора філософії Давидовського Ю.К., а саме:

- моделі статистичного аналізу та прогнозування обсягів вхідного потоку даних;
- метод оцінки параметрів комп'ютерної мережі, оснований на моделюванні функціонування мережі з урахуванням динаміки зміни трафіку;
- метод прийняття рішень зі стратегічного управління процесами надання телекомунікаційних послуг;
- інформаційна технологія інтерактивного моделювання комп'ютерної мережі та оптимізації її топології

впроваджені у навчальний процес кафедри комп'ютерних наук та інформаційних технологій в рамках дисциплін, пов'язаних з підготовкою студентів, а саме:

- у дисципліні «Статистичні та ймовірнісні методи даних-аналізу», яку викладає д.т.н., професор Малеева О.В. в об'ємі 4 годин лабораторної роботи (заняття за темою «Моделі прогнозування часових рядів»);
- у дисципліні «Комп'ютерні мережі в інформаційних системах», яку викладає к.т.н., доцент Кулик Ю.О. в об'ємі 4 лекційних годин (заняття за темами: «Транспортний рівень КМ», «Організація та послуги Інтернет»);
- у дисципліні «Проектно-орієнтоване управління створенням комп'ютерних систем», яку викладає к.т.н., доцент Яшина О.С. в об'ємі 2 лекційних годин (лекція за темою: «Основні методи розрахунку та моделювання характеристик системи»).

Результати дисертаційних досліджень Давидовського Ю.К. були також частково використані при виконанні курсових та кваліфікаційних робіт бакалаврів та магістрів, тематика яких пов'язана з використанням методів аналізу та моделювання комп'ютерних мереж.

**Голова комісії -**

завідувач кафедри  
комп'ютерних наук та  
інформаційних технологій,  
професор, д.т.н.



Олег ФЕДОРОВИЧ

**Члени комісії:**

доцент кафедри інтелектуальних  
вимірювальних систем та інженерії  
якості, доцент, к.т.н.



Андрій АНІКІН

професор кафедри  
комп'ютерних наук та  
інформаційних технологій,  
професор, д.т.н.



Олександр ПРОХОРОВ



**ЗАТВЕРДЖУЮ**

**Генеральний директор ТОВ "НПК  
"ХОУМ-НЕТ"**

**Романченко З.М.**

“ 14 ” вересня 2023 р.

**А К Т**

**впровадження результатів наукових досліджень  
Давидовського Юрія Костянтиновича,  
отриманих під час виконання дисертаційної роботи**

Комісія фахівців ТОВ "НПК "ХОУМ-НЕТ" у складі: голови – Мірошник Андрій Миколайович - посада радник генерального директора, науковий ступінь кандидата економічних наук, членів комісії – Шпак Володимир Степанович посада - технічний директор, вища ступінь освіти, Сагайдак Роман Іванович - посада директор з впровадження проектних рішень, вища ступінь освіти, Лобко Ігор Володимирович - посада головний інженер проекту - керівник відділу нагляду за реалізацією проектних рішень, вища ступінь освіти, склала цей акт про те, що в ході виконання конструкторської роботи за темою «Відновлення та перебудова мережі на звільнених територіях» використано результати дисертаційної роботи Давидовського Ю.К. у вигляді:

- моделі аналізу та імітації поведінки комп'ютерної мережі з урахуванням властивостей вхідного трафіку;
- метод моделювання та оцінки параметрів комп'ютерної мережі з огляду на її завантаженість.
- прикладна інформаційна технологія інтерактивного моделювання комп'ютерної мережі.

В результаті впровадження наукових положень та результатів дисертації Давидовського Ю.К. отримано науково-технічний ефект, пов'язаний з забезпеченням достовірності оцінювання параметрів комп'ютерної мережі та можливістю оптимізувати навантаження в мережі, і як наслідок підвищити якість телекомунікаційних послуг.

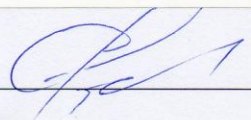
Запропоновані в роботі Давидовського Ю.К. метод та моделі реалізовані у прикладній інформаційній технології інтерактивного моделювання комп'ютерної мережі. Застосування отриманих результатів дозволило забезпечити досягнення цілей відновлення діяльності компанії, науково обґрунтовано приймати рішення про впровадження нових послуг згідно реальних вимог та потреб абонентів.

**Голова комісії:**

**Мірошник А.М.**


**Члени комісії:**

**Шпак В.С.**



---

**Сагайдак Р.И.**



---

**Лобко И.В.**

## ДОДАТОК Б.

## Список публікацій здобувача

Публікації здобувача за темою дисертації, в яких опубліковані основні наукові результати:

1. Давидовський, Ю. К., Малєєва, О. В., Косенко, В. В. & Персіянова О. Ю. (2018). Моделювання процесів перерозподілу трафіка в мережах передачі даних. *Математичні моделі та новітні технології управління економічними та технічними системами*: монографія. За заг. ред В. О. Тімофєєва, І. В. Чумаченко, Харків: ФОП Панов А. М., 261 - 270. ISBN 978-617-7541-98-0
2. Рева, О. А., & Давидовський, Ю. К. (2018). Розробка методики модернізації топології мережі для отримання квазіоднорідної структури. *Радіоелектронні і комп'ютерні системи*, 0(2), 43-51. <https://doi.org/10.32620/reks.2018.2.05>
3. Давидовський, Ю., Рева, О., & Малєєва, О. (2018). Метод моделювання параметрів мережі передачі даних для її модернізації. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*, (4(6), 15-22. <http://dx.doi.org/10.30837/2522-9818.2018.6.015>
4. Davydovskyi, Y., Reva, O., Artiukh, O., & Kosenko, V. (2019). Simulation of computer network load parameters over a given period of time. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*, (3 (9), 72–80. <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2019.9.072>
5. Davydovskyi, Y., Reva, O., Malyeyeva, O., & Kosenko, V. (2020). Application of the sliding window mechanism in simulation of computer network loading parameters. *Сучасні інформаційні системи*, 4(1), 16–22. <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2020.1.03>
6. Malyeyeva, O., Kosenko, V., Davydovskyi, Y., & Boiev, D. (2020). Factor synergy analysis and merger strategy models in investigation of

telecommunication operators' performance. *Сучасні інформаційні системи*, 4(2), 130–136. <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2020.2.19>

7. Smidovych, L., & Davydovskyi, Y. (2022). Processes of the telecom operator's information architecture transformation. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*, (1 (19), 47–54. <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2022.19.047>.

8. Malyeyeva, O., Davydovskyi, Y., & Kosenko V. (2019). Statistical analysis of data on the traffic intensity of Internet networks for the different periods of time. *Second International Workshop on Computer Modeling and Intelligent Systems (CMIS-2019)*, 897-910. ISSN 1613-0073. <https://ceur-ws.org/Vol-2353/paper71.pdf>

Публікації здобувача за темою дисертації, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

1. Малєєва, О. В., & Давидовський Ю.К. (2017, 12-13 жовтня). Алгоритм оптимізації топології графу в проектах модернізації інфокомунікаційної мережі. *VIII Міжнародна науково-практична конф. фахівців, магістрантів, аспірантів та науковців. «Управління проектами: проектний підхід в сучасному менеджменті»*, Одеса, 208 – 211.

2. Косенко, В. В. & Давидовський, Ю. К. (2017, 1-3 листопада). Математична модель закріплення прикладних завдань розподіленої системи по вузлах мережі. *Матеріали III міжнародної НТК. "Комп'ютерне моделювання та оптимізація складних систем"*. КМОСС-2017, Дніпро, 68-71.

3. Рева, О.А., Смідович, Л.С., & Давидовський Ю.К. (2018, 3-8 вересня). Дворівнева маршрутизація в SIP мережах. *XXVIII Міжнародна конференція «Нові технології у машинобудуванні»*, Коблево – Харків, 63.

4. Давидовський, Ю. К. (2018, 14-16 листопада). Аналіз засобів симуляції и емуляції мереж передачі даних. *Всеукраїнська VI міжнародна науково-технічна конференція «Проблеми інформатизації»*, Черкаси – Баку – Бельсько-Бяла – Полтава, 31.

5. Смідович, Л. С., Рева, О. А., & Давидовський Ю. К. (2019, 3-8 вересня) Система дистанційного навчання з курсу системний аналіз. *XXIX Міжнародна конференція «Нові технології у машинобудуванні»*, Коблево – Харків, 115.

6. Малєєва, О. В., Давидовський, Ю. К., & Малєєва, Ю. А. (2022, 13-16 вересня). Аналіз ефективності рішень з модернізації комп'ютерних мереж. *Міжнародна науково-практична конференція «Інтелектуальні інформаційні системи в управлінні проєктами та економіці в умовах воєнного стану»*, Коблево, 78-80.

Свідоцтва про реєстрацію авторського права:

1. Рева, О. А., Давидовський Ю. К., Казимов Р. Р., Смідович Л. С., & Соколов А. В. (2019). *Комп'ютерна програма “Програма FossProtectControl для управління з'єднаннями захищених каналів”*. Свід. про реєстр. автор. права на твір № 89926. Зареєстр. в Міністерстві економічного розвитку і торгівлі України 19.06.2019.

2. Рева, О. А., Давидовський Ю. К., Казимов Р. Р., & Соколов А. В. *Комп'ютерна програма “Програма FossProtectAgent для робочого місця с захищеним каналом з'єднання*. Свід. про реєстр. автор. права на твір № 89927. – Зареєстр. в Міністерстві економічного розвитку і торгівлі України 19.06.2019.