

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»

Кваліфікаційна праця  
на правах рукопису

Федевич Ольга Юріївна

УДК 004.042 + 004.738

ДИСЕРТАЦІЯ

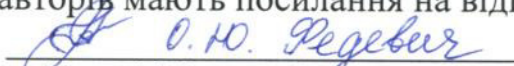
ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ АНАЛІЗУ ТА  
ПРОГНОЗУВАННЯ ТРАФІКУ В КОМП'ЮТЕРНИХ МЕРЕЖАХ

05.13.06 – інформаційні технології  
(шифр і назва спеціальності)

05 «Технічні науки»  
(галузь знань)

Подається на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

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

  
(підпис, ініціали та прізвище здобувача)

Науковий керівник –  
Дронюк Іванна Мирославівна,  
к.ф.-м.н., доцент

Ідентичність всіх примірників дисертації  
ЗАСВІДЧУЮ:  
Вчений секретар спеціалізованої  
вченої ради



Львів – 2018

## АНОТАЦІЯ

*Федевич О.Ю.* Інформаційна технологія аналізу та прогнозування трафіку в комп'ютерних мережах. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук (доктора філософії) за спеціальністю 05.13.06 «Інформаційні технології» (122 – Комп'ютерні науки). - Національний університет «Львівська Політехніка» МОН України, Львів, 2018.

Сучасні комп'ютерні та телекомунікаційні системи на теперішній стадії розвитку стали складною та неструктурованою мережею, що здійснює передавання даних між серверами та клієнтами, між сегментами мереж за допомогою різнотипного мережного обладнання, зокрема мережевих маршрутизаторів та комутаторів міток. Невпинне зростання кількості корисної інформації на планеті призводить до збільшення завантаження телекомунікаційних та комп'ютерних систем, а комп'ютерних мереж зокрема. Тому першочерговим завданням на сьогоднішній день є забезпечення та проведення аналізу переваг та недоліків особливостей структури, архітектури та функціонування сучасних комп'ютерних мереж, а також різноманітних методів адаптивного управління обладнанням таких мереж, розвитку методів прогнозування інтенсивності потоків трафіку, методів маршрутизації та перенаправлення потоків даних між вузлами в комп'ютерних мережах.

В дисертаційній роботі представлено розв'язання наукового завдання, яке полягає у зменшенні часових затримок передавання даних шляхом розроблення інформаційної технології аналізу та прогнозування трафіку в комп'ютерних мережах.

Перший розділ роботи містить огляд літературних та інформаційних джерел за темою дисертації в рамках сучасного стану та прогнозованого розвитку комп'ютерних мереж та зростання об'ємів даних, які ними передаються. Проведено дослідження методів та існуючого інструментарію, інформаційних технологій, які використовуються для прогнозування та моделювання потоків трафіку в комп'ютерних мережах, виділено їхні основні переваги та недоліки.

Опрацьовані статистичні дані показують, що в майбутньому з кожним роком буде зростати потреба у створенні інформаційних технологій різних видів, зокрема інформаційних технологій прогнозування та аналізу мережного трафіку, які дадуть змогу ефективно використовувати не лише комп'ютерні мережі для передавання інформації різного роду, а, зокрема, і ефективно працювати з різнотипними даними та метаданими. Для розроблення таких інформаційних технологій є необхідно здійснити аналіз існуючих моделей опису трафіку, розглянути та дослідити їхні переваги та недоліки.

На підставі проведеного огляду літературних джерел розглянуто математичну модель опису трафіку як самоподібного процесу, математичну модель опису трафіку на підставі дифузійних рівнянь, моделювання трафіку за допомогою методів теорії систем масового обслуговування, та різних модифікацій таких моделей.

У другому розділі показано проблематику моделювання періодичних процесів в нелінійних системах, а також проблеми побудови та прогнозування роботи таких систем. Здійснено дослідження нелінійних диференціальних рівнянь коливних систем з одним ступенем вільності. Ці дослідження в повній мірі показали актуальність розроблення методик для моделювання поведінки таких систем. Виходячи з цього, було запропоновано розробити модель нелінійної коливної системи з одним ступенем вільності, рух якої описується з допомогою системи звичайних диференціальних рівнянь першого порядку. Також було запропоновано розв'язати дану задачу моделювання з допомогою теорії Атеб-функцій.

Наступним кроком було розроблено модель потокового трафіку в комп'ютерних мережах на основі нелінійних диференціальних рівнянь коливного руху з одним ступенем вільності, розв'язання яких було побудовано на основі асимптотичного методу Боголюбова-Митропольського. Також було показано, що незбурений розв'язок виражається через Атеб-функції. Відхилення тренду трафіку від основного потоку змодельовано за допомогою дельта-функцій із застосуванням малого параметра, випадкових за появою в часі.

В подальшому було змодельовано коливання трафіку за допомогою розробленої математичної моделі трафіку. Для здійснення експериментального

тестування результатів модельних експериментів було використано зразки трафіку комп'ютерної мережі Інституту теоретичної та прикладної інформатики Польської Академії Наук за критерієм максимальної кореляції.

Також показано застосування методу усереднення Боголюбова-Митропольського для вирішення різнотипних завдань, а також подано опис математичного апарату Ateb-функцій, та показано застосування цих функцій для вирішення задач у різних галузях людської діяльності.

Третій розділ роботи присвячено реалізації моделювання збурень, методу короткострокового прогнозування інтенсивності трафіку та удосконаленні методу маршрутизації пакетів у мережному обладнанні. Розроблено та реалізовано алгоритмічний метод, призначений для імітаційного моделювання збурень в нелінійних коливних системах. Змодельовано поведінку системи при незбурених коливаннях, та процеси у нелінійних коливних системах з малим збуренням. Проведено аналіз розв'язків диференціальних рівнянь на основі Ateb-функцій та їхньої застосовності для моделювання трафіку в комп'ютерній мережі.

Розроблено метод короткострокового прогнозування інтенсивності трафіку, який за рахунок використання концепції добової ритміки забезпечує обґрунтування методу статистичного опрацювання даних трафіку в комп'ютерній мережі. Показано, що найбільшу користь при використанні розробленої моделі трафіку в комп'ютерній мережі можна отримати у випадку дослідження та прогнозування найбільш нелінійних ділянок трафіку в порівнянні з існуючим, при цьому зберігаючи відповідність (у межах норми) з реальним трафіком та іншими попередньо розробленими моделями трафіку.

Розроблено аналізатор трафіку комп'ютерної мережі, головним призначенням якого є збір зразків трафіку, з подальшою можливістю прогнозування значень трафіку за допомогою математичного механізму Ateb-функцій. В результаті роботи розробленого програмного забезпечення параметри та значення трафіку візуально відображаються на графіках та розробляються відповідні рекомендації про перерозподіл навантаження у комп'ютерній мережі в режимі реального часу.

Враховуючи розроблений метод прогнозування, було удосконалено метод маршрутизації мережного трафіку з метою покращення роботи вузлого обладнання комп'ютерних мереж, здійснено опис програмного продукту для розробленої автором інформаційної технології аналізу та прогнозування трафіку в комп'ютерних мережах, показано та підтверджено адекватність роботи методу короткострокового прогнозування трафіку.

Розроблений аналізатор трафіку було протестовано на зразках трафіку, отриманих у комп'ютерній мережі кафедри автоматизованих систем управління НУ «ЛП», а також на зразках трафіку, зібраних у комп'ютерній мережі Інституту теоретичної та прикладної інформатики Польської Академії Наук, які були отримані за допомогою програмного забезпечення Wireshark та з використанням розробленого програмного забезпечення для забезпечення підтвердження достовірності результатів досліджень.

У четвертому розділі описано проведення тестування розроблених методів сукупно, а також подано підтвердження ефективності розробленої інформаційної технології за допомогою засобів комп'ютерного імітаційного моделювання, що показало можливі варіанти її застосування.

Також було розроблено рекомендації для оптимізації роботи комп'ютерної мережі на основі проведених експериментів.

Проведення та опис цих експериментів здійснювалось з метою відлагодження та демонстрації розробленої математичної моделі трафіку та верифікації роботи розроблених методів на різних завантаженнях каналів комп'ютерної мережі. З проведених експериментів видно, що розроблені методи та модель можуть застосовуватись не тільки для аналізу трафіку у магістральних каналах передачі даних, а й у сегменті комп'ютерної мережі, однак у останньому випадку вони не будуть настільки ефективними, як у першому, оскільки характер трафіку в сегменті комп'ютерної мережі не є сильно пульсуючим, на відміну від трафіку у магістральних каналах передачі даних, де він є сильно пульсуючим та самоподібним.

Підтверджено ефективність роботи методу короткострокового прогнозування

інтенсивності трафіку даних, тоді як використання іншого відомого методу прогнозування на основі похідних дало значно гірші результати. Тобто метод короткострокового прогнозування інтенсивності трафіку даних показав в середньому кращі результати порівняно з методом прогнозування на основі похідних. Також було здійснено дослідження різних програмних середовищ та інструментарію для здійснення комп'ютерного імітаційного моделювання роботи мереж та на основі проведеного аналізу обрано середовище OMNeT++. У обраному середовищі розроблено тестові топології на основі даних, отриманих з проекту The Opte Project.

Проведено експерименти комп'ютерного імітаційного моделювання роботи розроблених топологій мереж, які показують покращення роботи мережного обладнання за параметром зменшення середньої зміни джиттера при використанні розроблених методів, а також параметрів середньої затримки передавання пакетів, середньоквадратичного відхилення, максимальної затримки, мінімальної затримки.

В рамках розв'язання наукового завдання розроблення моделі та методів прогнозування та перерозподілу трафіку з метою зменшення часових затримок передавання даних, набув подальшого розвитку метод перерозподілу даних трафіку, який за рахунок прогнозування інтенсивностей пульсацій потоку даних, забезпечує мінімізацію джиттера трафіку комп'ютерній мережі, що дало змогу підвищити якість роботи мережного обладнання.

Ключові слова: інформаційна технологія, трафік, комп'ютерна мережа, Ateb-функція.

Список публікацій здобувача:

*Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:*

1. Medykovskyy M. Modelling the Perturbation of Traffic Based on Ateb-functions / I. Droniuk, M. Nazarkevich, O. Fedevych // Communications in Computer and Information Science. – 2013. – Vol. 370, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2013, pp.38-44. (Scopus, Web of Science).

2. Dronjuk I. Asymptotic method of traffic simulation (Distributed Computer and Communication Networks) / Maria Nazarkevych, Olga Fedevych // Communications in Computer and Information Science. – 2014. – Springer 2014, Vol. 279, pp.136-144. (Scopus, Web of Science).

3. Dronyuk I. Synthesis of noise-like signals based on Ateb-functions / M. Nazarkevych, O. Fedevych // Communications in Computer and Information Science: Revised Selected Papers, Vol.601, Springer International Publishing Switzerland. – 2016. pp.132-140. (Scopus, Web of Science).

4. Fedevych O. Monitoring and analysis of measured and modeled traffic of TCP/IP Networks / Ivanna Droniuk, Maria Nazarkevych // Communications in Computer and Information Science, Vol. 608, Springer Int. Publishing Switzerland. – 2016. pp. 32-41. (Scopus, Web of Science).

5. Dronyuk I. Traffic Flows Ateb-Prediction Method with Fluctuation Modeling Using Dirac Functions / Fedevych O. // Communications in Computer and Information Science, vol 718. Springer International Publishing Switzerland. – 2017. pp. 3-13. (Scopus, Web of Science).

6. Дронюк І.М. Прогнозування трафіку комп'ютерних мереж для підвищення ефективності використання мережевого обладнання / Дронюк І.М., Федевич О.Ю. // Наук. вісн. НЛТУ України. – 2015. – Вип.25.5. – С.301-307. (Index Copernicus).

7. Дронюк І.М. Програмний комплекс моніторингу та прогнозування трафіку потоку в сегменті комп'ютерної мережі / Дронюк І.М., Федевич О.Ю. // Наук. вісн. НЛТУ України.-2015. – Вип.25.10. – С.295-301. (Index Copernicus).

8. Федевич О.Ю. Аналізатор протоколів комп'ютерної мережі для оптимізації адаптивного управління трафіком потоку // Наук. вісн. НЛТУ України. – 2016. – Вип. 26.03. – С.374-380. (Index Copernicus).

9. Федевич О.Ю. Застосування методу Ateb-прогнозування для зменшення інтенсивності завантаження каналів комп'ютерних мереж // Наук. вісн. НЛТУ України. – 2016. – Вип. 26.08. – С.375-381. (Index Copernicus).

10. Дронюк І. М. Аналіз трафіку комп'ютерної мережі на основі експериментальних даних середовища Wireshark / Дронюк І. М., Федевич О. Ю. //

Вісник Нац. ун-ту "Львівська політехніка". – 2015. – № 814 : Інформаційні системи та мережі. – С. 55–62.

11. Кордяк В.І. Інформаційна технологія моніторингу та аналізу трафіку у комп'ютерних мережах / Кордяк В.І., Дронюк І. М., Федевич О. Ю. // Вісник Нац. ун-ту "Львівська політехніка". – 2015. – № 826 : Комп'ютерні науки та інформаційні технології. – С. 35–42.

12. Дронюк І.М. Моніторинг та аналіз реального та модельного трафіку комп'ютерної мережі / Дронюк І.М., Федевич О.Ю. // В зб.наукових праць Інституту проблем моделювання в енергетиці ім.Г.Є.Пухова. Вип.74 К. – 2015. – С.74-81.

*Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:*

13. Droniuk I. Modeling the Small Perturbation in Vibration Systems Based on Ateb – Functions / Droniuk I., Fedevych O. // Матеріали дев'ятої Міжнародної науково-технічної конференції «Перспективні технології і методи проектування MEMS» (MEMSTECH 2013). — Львів-Поляна. – 2013. — С. 100 – 103.

14. Droniuk I. Investigation of Computer Network Traffic Using Network Protocol Analyzer // Droniuk I, Fedevych O. // Матеріали десятої Міжнародної науково-технічної конференції «Перспективні технології і методи проектування MEMS» (MEMSTECH 2014). — Львів. – 2014. — С. 74.

15. Федевич О. Дослідження трафіку комп'ютерних мереж засобами аналізатора мережевих протоколів // Збірник тез доповідей підсекції «Інформаційні управляючі системи і технології» 72-ої науково-технічної студентської конференції. – Львів. – 2014. – С. 142-144.

16. Droniuk I. Construction of Noise-like signals Based on Ateb – Functions / Droniuk I., Fedevych O. // Матеріали XIII Міжнародної науково-технічної конференції «Досвід розробки і застосування САПР в мікроелектроніці» (CADSM 2015). — Львів-Поляна. – 2015. — С. 42 – 44.

17. Dronyuk I. Synthesis of noise-like signals based on Ateb-functions / Dronyuk I., Nazarkevych M., Fedevych O. // In Proceedings of The 18-th International Conference on Distributed Computer and Communication Networks: Control, Computation,



Communications (DCCN-2015). Moscow: JSC "TECHNOSPHERA". – 2015. – P.223-232.

18. Кордяк В.І. Аналізатор роботи комп'ютерної мережі на базі QT framework / Кордяк В.І., Федевич О.Ю. // Матеріали п'ятої науково-практичної конференції FOSS Lviv. – 2015. – С.55-56.

19. Дронюк І.М. Аналіз трафіку на основі даних програмного забезпечення Wireshark / Дронюк І.М., Федевич О.Ю., Кордяк В.І. // Матеріали міжнародної наукової конференції «Інтелектуальні системи прийняття рішень та проблеми обчислювального інтелекту» (ISDMCI 2015). – Херсон, видавництво ХНТУ, 2015. – С. 56-59.

20. Droniuk I. Forecasting of the trend of traffic based on Ateb-functions theory / Droniuk I., Fedevych O. // Proceedings of the 10-th International Scientific and Technical Conference «Computer Science and Information Technologies» (CSIT 2015) Lviv. – 2015. – P.139 - 141. (Scopus)

21. Дронюк І.М. Оптимізація роботи комп'ютерних мереж за критерієм ефективного використання вузлового обладнання / Дронюк І.М., Федевич О.Ю., Труняк М.С. // Матеріали VI-ї Всеукраїнської науково-практичної конференції «Сучасні інформаційні технології в економіці, менеджменті та освіті» (CITEM 2015) Львів. — 2015. — С.63 — 66.

22. Droniuk I. Computer network protocol analyzer designed for accuracy of traffic trends forecasting / Droniuk I., Fedevych O. // Матеріали XII Міжнародної науково-технічної конференції «Перспективні технології і методи проектування MEMC» (MEMSTECH 2016) Львів-Поляна. — 2016. — С. 155 – 157.

23. Федевич О.Ю. Програмне забезпечення для аналізу протоколів комп'ютерної мережі для ОС Ubuntu // Матеріали шостої міжнародної конференції FOSS Lviv. – 2016. – С.22-23.

24. Дронюк І.М. Аналізатор трафіку потоку з вбудованим модифікованим алгоритмом маршрутизації / Дронюк І.М., Федевич О.Ю. // Матеріали XII міжнародної наукової конференції «Інтелектуальні системи прийняття рішень та

проблеми обчислювального інтелекту» (ISDMCI 2016) Залізний порт. — 2016. — С.61 — 63.

25. Droniuk I. Ateb-prediction Simulation of Traffic Using OMNeT++ Modeling Tools / Droniuk I., Fedevych O, Lipinski P. // Proceedings of the 10-th International Scientific and Technical Conference «Computer Science and Information Technologies» (CSIT 2016) Lviv. – 2016. – P. 96 - 98. (Scopus)

26. Droniuk I. The Generalized shift operator and non-harmonic signal analysis / Droniuk I., Fedevych O., Poplavska Z. // Матеріали XIV Міжнародної науково-технічної конференції «Досвід розробки і застосування САПР в мікроелектроніці» (CADSM 2017) Львів-Поляна. — 2017. — С. 89 – 91. (Scopus)

27. Droniuk I. Optimization of the Computer Network work based on Adaptive Management of Node Equipment / Droniuk I. Fedevych O., Maslanych I. // Proceedings of the 11-th International Scientific and Technical Conference «Computer Science and Information Technologies» (CSIT 2017) Lviv. – 2017. – P. 272-275. (Scopus)

*Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:*

28. Пат. 106989 Україна, МПК:Н04L 12/02, Н03Н 21/00 Пристрій для адаптивного управління трафіком потоку в сегменті комп'ютерної мережі / І.М. Дронюк, О.Ю. Федевич; власник Нац. ун-т «Львів. політехніка». – № 201512669 ; заявл. 21.12.2015; опублік. 10.05.2016, Бюл. № 9. – 2 с.

29. Комп'ютерна програма “Аналізатор мережевих протоколів з прогнозуванням поведінки трафіку потоку”: свід. про реєстр. автор. права на твір № 72331 / Дронюк Іванна Мирославівна, Лізанець Данило Іванович, Федевич Ольга Юріївна; Національний університет «Львівська політехніка». – Зареєстр. в Упр. держ. Реєстрацій Департаменту інтелектуальної власності Мін. Економічного розвитку і торгівлі України заявка 13.03.2017 № 72608; Реєстр. 21.06.2017.

## ABSTRACT

*Fedevych O.Yu.* Information technology for analysis and prediction of traffic flows in computer networks. - Proficiency scientific treatise on the rights of the manuscript.

A thesis submitted in fulfilment of the candidate of sciences (Ph.D.) degree in technical sciences on specialty 05.13.06 «Information technologies» (122 – Computer Sciences). - Lviv Polytechnic National University of Ministry for Education and Science of Ukraine, Lviv, 2018.

Modern computer and telecommunications systems at the current stage of development became complex and unstructured networks, which transfer data between servers and clients, between segments of networks using a variety of network equipment, in particular, network routers and switches labels. The steady increase in the amount of useful information on the planet, leads to an increase in a load of communications and computer systems, computer networks in particular. Therefore, the primary task today is the provision and analysis of advantages and disadvantages, peculiarities of structure, architecture, and operation of modern computer networks, as well as various methods of adaptive control of the equipment of such networks, development of methods to predict the intensity of traffic flows, routing methods and forwarding the data streams between nodes in computer networks.

In the dissertation work the solution of a scientific problem is presented, which lays in developing of model and methods for forecasting and redistributing traffic in order to reduce the time delays of data transmission.

The first section of the thesis contains the review of literature and information sources on the topic of the thesis within the current state and predicted development of computer networks and growth of the data volume, which they transfer. A study of methods and existing tools and information technologies, which are used for forecasting and simulation of traffic flows in computer networks was conducted. The main advantages and disadvantages were identified.

Processed statistical data shows that in the future by every year the need for the creation of information technologies of various kinds will increase, in particular information technologies for forecasting and analysis of network traffic, which will allow effective use of computer networks not only to transmit information of a different kind, and, in particular to work effectively with diverse data and metadata. The development of

such information technologies needs to analyze the existing models that describe the traffic to consider and explore their advantages and disadvantages.

On the basis of the reviewed literature sources the mathematical model describing the traffic as a self-similar process, the mathematical model of traffic based on the diffusion equations were considered, and modeling of traffic using the methods of the theory of queueing systems, various modifications of such models were considered also.

The second section shows the problems of the simulation of periodic processes in nonlinear systems, as well as problems of construction and operation of such systems. A study of nonlinear differential equations of vibrating systems with one degree of freedom was conducted. This investigations have fully shown the urgency of developing new techniques to model the behavior of such systems. On this basis, it was proposed to develop a model of the nonlinear vibrating system with one degree of freedom, where movement is described using a system of ordinary differential equations of the first order. It was also proposed to solve this modeling problem by using the theory of Ateb-functions.

At the next step, a model of traffic stream in computer networks based on nonlinear differential equations of vibrational motion with one degree of freedom was developed, the solution of which was built on the basis of the Bogolyubov-Mitropolski asymptotic method. It is shown that unbiased solution can be expressed using Ateb-functions. The deviation of the trend of traffic from the main flow is modeled using delta functions with applying of the small parameter, with a random appearance in time.

Furtherly, the fluctuations of traffic were simulated using the developed mathematical model of traffic. In the purpose of conducting the experimental tests of the results of model experiments the traffic sample, collected from a computer network of Institute of Theoretical and Applied Informatics, Polish Academy of Sciences according to the criterion of maximum correlation was used.

The use of the Bogolyubov-Mitropolskii averaging method for solving of different types of tasks, as well as the description of the mathematical apparatus of Ateb-functions also were shown and the use of these functions for solving problems in various fields of human activity was demonstrated.

The third section covers the implementation of perturbations modeling, the method of short-term forecasting of the traffic intensity and the improvement of a method of routing packets in the network equipment. The algorithmic method for simulation of perturbations in nonlinear oscillatory systems was implemented. The behavior of the system during undisturbed fluctuations, and the processes in nonlinear oscillatory systems with small perturbation were modeled. The analysis of solutions of differential equations based on Ateb-functions and their applicability for traffic simulation in computer network was conducted.

The method of short-term forecasting the traffic intensity was developed, that due to the use of the concept of a daily rhythm provides the substantiation of the method of statistical processing of traffic data in computer networks. It is shown that the greatest benefit of using the developed traffic model in a computer network can be obtained in the case of prediction of the most nonlinear areas of traffic compared to the existing while maintaining compliance (within normal limits) with real traffic and other pre-designed models of traffic.

The computer network traffic analyzer was developed, the main purpose of which is the collection of traffic patterns, with the subsequent possibility of predicting the values of the traffic using the mathematical mechanism of Ateb-functions. In the result of software work the parameters of traffic are visually represented on graphs and recommendations on load redistribution in a computer network are provided in real time.

Considering developed traffic prediction method, a method for routing network traffic was improved in order to improve the operation of a node equipment of computer network. A description of a software product developed by the author as a part of information technology for analysis and forecasting of traffic in computer networks are shown and the adequacy of the short-term traffic forecasting method was provided.

The traffic analyzer was developed and tested on samples of traffic received on a computer network of LPNU's automated control systems department and on the traffic samples collected in computer networks of Theoretical and Applied Informatics, Polish Academy of Sciences, which were obtained using the software Wireshark, and using the developed software to ensure the validation of research results.

The fourth section describes the testing of the developed techniques together and presents the confirmation of the effectiveness of the developed information technology using computer simulation, showing the possible options for its usage.

Also, recommendations for optimizing of computer networks work on the basis of the experiments were developed.

The implementation and description of these experiments were carried out for debugging purposes and demonstration of the developed mathematical model of the traffic and testing of developed methods on a various loaded channels of computer network. The conducted experiments show that the developed methods and model can be used not only to analyze the traffic in the main channels of data transmission but also in the segment of the network, but in the latter case they will not be as effective as in the first, as the nature of the traffic in the segment of the network is not strongly pulsating, in contrast to the traffic in the main channels of data transfer, where it is highly pulsating and highly self-similar.

The efficiency of the method of short-term forecasting the traffic of data was confirmed while using another well-known forecasting method based on derivative gives much worse results. That is, the method of short-term forecasting of traffic data, on average, showed the better results compared to the forecast method based on derivatives. After exploring different software environments and tools for computer simulation of networks and on the basis of the that analysis was selected the OMNeT++ environment. In the selected environment, the test topologies were designed on the basis of the data obtained from The Opte Project.

The computer simulation experiments of developed network topologies functioning were conducted, and showed the improvement of network work by setting a reduction in the average changes of jitter when using the developed methods, as well as the parameters of the average delay of packets, the standard deviation, the maximum delay, the minimum delay.

As a part of solving the scientific task of developing models and methods for forecasting and redistributing traffic in order to reduce the time delays of data transmission, the method of redistributing of data traffic acquired further development due

to the prediction of intensities of pulsations of data flow that minimizes a jitter of the traffic from a computer network, thus improving the reliability of the simulation results.

Keywords: information technology, network traffic, computer network, Ateb-functions.

The list of author's publications:

*Proceedings where basic scientific results of thesis were published:*

1. Medykovskyy M. Modelling the Perturbation of Traffic Based on Ateb-functions / I. Droniuk, M. Nazarkevich, O. Fedevych // Communications in Computer and Information Science. – 2013. – Vol. 370, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2013, pp.38-44. (Scopus, Web of Science).

2. Dronjuk I. Asymptotic method of traffic simulation (Distributed Computer and Communication Networks) / Maria Nazarkevych, Olga Fedevych // Communications in Computer and Information Science. – 2014. – Springer 2014, Vol. 279, pp.136-144. (Scopus, Web of Science).

3. Dronyuk I. Synthesis of noise-like signals based on Ateb-functions / M. Nazarkevych, O. Fedevych // Communications in Computer and Information Science: Revised Selected Papers, Vol.601, Springer International Publishing Switzerland. - 2016. pp.132-140. (Scopus, Web of Science).

4. Fedevych O. Monitoring and analysis of measured and modeled traffic of TCP/IP Networks / Ivanna Droniuk, Maria Nazarkevych // Communications in Computer and Information Science, Vol. 608, Springer Int. Publishing Switzerland. – 2016. pp. 32-41. (Scopus, Web of Science).

5. Dronyuk I. Traffic Flows Ateb-Prediction Method with Fluctuation Modeling Using Dirac Functions / Fedevych O. // Communications in Computer and Information Science, vol 718. Springer International Publishing Switzerland. – 2017. pp. 3-13. (Scopus, Web of Science).

6. Droniuk I.M. Computer networks traffic prediction to improve the efficiency of network equipment use / I.M. Droniuk, O.Yu. Fedevych // Science jor. of UNFU. – 2015. – Vol. 25.5. – pp.301-307. (Index Copernicus).

7. Droniuk I.M. Software complex for monitoring and forecasting of traffic flow in the segment of the computer network / I.M. Droniuk, O.Yu. Fedevych // Science jor. of UNFU. – 2015. – Vol.25.10. – pp.295-301. (Index Copernicus).

8. Fedevych O.Yu. Computer network protocol analyzer for optimizing of adaptive traffic flow management // Science jor. of UNFU. – 2016. – Vol. 26.03. – pp.374-380. (Index Copernicus).

9. Fedevych O.Yu. Applying of the Ateb-forecasting method to reduce the intensity of computer networks channels load // Science jor. of UNFU. – 2016.-Vol. 26.08. – pp.375-381. (Index Copernicus).

10. Droniuk I.M. Analysis of computer network traffic based on experimental data of the environment Wireshark / I.M. Droniuk, O.Yu. Fedevych // Journal of Lviv Polytechnic National University. – 2015. – № 814 Series: Information systems and networks. – pp. 55-62.

11. Kordyak V.I. Information technology for monitoring and analysis of traffic in computer networks / Kordyak V.I., I.M. Droniuk, O.Yu. Fedevych // Journal of Lviv Polytechnic National University. – 2015. – № 826 Series: Computer Sciences and Information Technologies. – pp. 35-42.

12. Droniuk I.M. Monitoring and analysis of real and modeled traffic of a computer network / I.M. Droniuk, O.Yu. Fedevych // Journal of science works of Institute of Modeling Problems in Power Engineering named after H. Ye Pukhov. Vol.74 K.2015. – pp.74-81.

*Proceedings that certify an approvment of thesis materials:*

13. Droniuk I. Modeling the Small Pertrubation in Vibration Systems Based on Ateb – Functions / Droniuk I., Fedevych O. // Proceedings of the IX-th international scientific and technical conference Perspective technologies and methods in MEMS design (MEMSTECH 2013). Lviv-Polyana. — 2013. — pp. 100 – 103.

14. Droniuk I. Investigation of Computer Network Traffic Using Network Protocol Analyzer // Droniuk I, Fedevych O. // Proceedings of the X-th international scientific and technical conference Perspective technologies and methods in MEMS design (MEMSTECH 2014). Lviv-Polyana. — 2014. — pp. 74.



15. Fedevych O. Investigation of computer network traffic by means of network protocol analyzer // Proceedings of 72<sup>th</sup> scientific and technical student conference in subsection of “Information management systems and technologies”. Lviv. –2014. – pp. 142-144.

16. Droniuk I. Construction of Noise-like signals Based on Ateb – Functions / Droniuk I., Fedevych O. // Proceedings of the XIII-th international scientific and technical conference “The experience of designing and application of CAD systems in microelectronics” (CADSM 2015). Lviv-Polyana. — 2015. — pp. 42 – 44.

17. Droniuk I. Synthesis of noise-like signals based on Ateb-functions / Droniuk I., Nazarkevych M., Fedevych O. // In Proceedings of The 18-th International Conference on Distributed Computer and Communication Networks: Control, Computation, Communications (DCCN-2015) Moscow. — 2015. — P.223-232.

18. Korczyk V.I. Computer network work analyzer based on QT framework / Korczyk V.I., Fedevych O.Yu. // Proceedings of the V-th scientific and practical conference Free/Libre and Open-Source Software Lviv (FOSS Lviv). — 2015. — pp.55-56.

19. Droniuk I.M. Traffic analysis based on Wireshark software data / Droniuk I.M., Fedevych O. Yu., Korczyk V.I. // Proceedings of the XI-th international scientific conference "Intellectual systems of decision-making and problems of computational intelligence" (ISDMCI'2015). Kherson. – 2015. – pp. 56-59.

20. Droniuk I. Forecasting of the trend of traffic based on Ateb-functions theory / Droniuk I., Fedevych O. // Proceedings of the 10-th International Scientific and Technical Conference “Computer Sciences and Information Technologies” (CSIT 2015). Lviv. – 2015. – pp.139 - 141. (Scopus)

21. Droniuk I.M. Computer networks work optimization by using of criteria of effective use of node equipment / Droniuk I.M., Fedevych O. Yu., Truniak M.S. // Proceedings of the VI-th Ukrainian scientific and practical conference “Modern information technologies in economy, management and education” (MITEM 2015). Lviv — 2015. — pp.63 — 66.

22. Droniuk I. Computer network protocol analyzer designed for accuracy of traffic trends forecasting / Droniuk I., Fedevych O. // Proceedings of the XII International Scientific and Technical Conference “Perspective technologies and methods in MEMS design” (MEMSTECH 2016). Lviv-Polyana. — 2016. — pp. 155 - 157.

23. Fedevych O.Yu. Software for computer network protocol analysis for OS Ubuntu // Proceedings of the VI-th scientific and practical conference “Free/Libre and Open-Source Software Lviv” (FOSS Lviv). — 2016. — pp.22-23.

24. Droniuk I.M. Traffic flow analyzer with embedded modified route algorithm / Droniuk I.M., Fedevych O. Yu. // Proceedings of the XII-th International Scientific Conference "Intellectual systems of decision-making and problems of computational intelligence" (ISDMCI 2016). Zaliznyj port. — 2016. — pp.61 - 63.

25. Droniuk I. Ateb-prediction Simulation of Traffic Using OMNeT++ Modeling Tools / Droniuk I., Fedevych O., Lipinski P. // Proceedings of the 10-th International Scientific and Technical Conference “Computer Sciences and Information Technologies” (CSIT 2016). Lviv. — 2016 — pp.96 - 98. (Scopus)

26. Droniuk I. The Generalized shift operator and non-harmonic signal analysis / Droniuk I., Fedevych O., Poplavska Z. // Proceedings of the XIV-th International Scientific and Technical Conference “The experience of designing and application of CAD systems in microelectronics” (CADSM 2017). Lviv-Polyana. — 2017. — pp. 89 – 91. (Scopus)

27. Droniuk I. Optimization of the Computer Network work based on Adaptive Management of Node Equipment / Droniuk I. Fedevych O., Maslanych I. // Proceedings of the 11-th International Scientific and Technical Conference “Computer Sciences and Information Technologies” (CSIT 2017). Lviv. — 2017. — pp. 272-275. (Scopus)

*Scientific works, which additionally reflect the scientific results of the dissertation:*

28. Pat.106989 Ukraine, IPC: H04L 12/02, H03N 21/00 A device for adaptive management of traffic flow in a computer network segment / I.M. Droniuk, O.Yu. Fedevych; Owner: Lviv Polytechnic National University. - № 201512669; stated. 12.2.2015; Published May 10, 2016, Bul. No. 9. - 2 p.

29. Computer program "Analyzer of network protocols with prediction of traffic flow behavior": Certificate about the registry of author rights № 72331 / Droniuk Ivanna Myroslavivna, Danylo Ivanovych Lizanets, Olga Yuriyvna, Fedevych; Lviv Polytechnic National University - Registered in Control State of Registrations of the Department of Intellectual Property of Ministry of Economic Development and Trade of Ukraine. Application date: March 13, 2017 No. 72608; Registered: June 21, 2017.

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	25
РОЗДІЛ 1. Аналіз методів моделювання та прогнозування передавання трафіку в комп'ютерних мережах. ....	32
1.1. Аналіз та порівняння перспектив росту завантаженості комп'ютерних мереж.....	32
1.2. Аналіз методів моделювання трафіку .....	38
1.2.1. Аналіз методів моделювання трафіку на основі дифузійних рівнянь.....	38
1.2.2. Аналіз методів моделювання та прогнозування трафіку на основі теорії масового обслуговування та властивостей самоподібності.....	42
1.3. Аналіз методів маршрутизації в комп'ютерних мережах.....	51
1.4 Обґрунтування вибору напрямку досліджень та постановка наукового завдання.....	53
РОЗДІЛ 2 Розроблення математичної моделі трафіку на основі нелінійних диференціальних рівнянь коливних систем з одним ступенем вільності.....	56
2.1. Асимптотичний метод Боголюбова-Митропольського для розв'язання нелінійних диференціальних рівнянь коливного руху з одним ступенем вільності.....	56
2.2. Застосування методу усереднення Боголюбова-Митропольського.....	63
2.3. Атеb-функції та їх застосування для розв'язання систем нелінійних диференціальних рівнянь з одним ступенем вільності.....	65
2.4. Застосування нелінійних диференціальних рівнянь коливного руху для моделювання періодичних процесів та поведінки цих систем .....	68
2.5. Застосування методу Боголюбова-Митропольського для побудови математичної моделі трафіку.....	70
2.6. Застосування методу Боголюбова-Митропольського, Атеb-функцій та їх властивостей для побудови математичної моделі трафіку .....	74
2.6.1. Адекватність розробленої математичної моделі трафіку .....	75

РОЗДІЛ 3 Розроблення методу короткострокового прогнозування інтенсивності трафіку та удосконалення методу маршрутизації трафіку у вузловому обладнанні.....	80
3.1. Алгоритм моделювання збурень в нелінійних системах та його реалізація.....	80
3.2. Характеристика інструментальних засобів та їх використання для дослідження трафіку.....	86
3.2.1. Характеристика аналізаторів мережевих протоколів .....	86
3.3. Загальна характеристика інформаційної технології аналізу та прогнозування трафіку комп'ютерних мереж .....	92
3.3.1. Загальна структура інформаційної технології аналізу та прогнозування трафіку комп'ютерних мереж.....	92
3.3.2. Використання системи керування базами даних PostgreSQL у інформаційній технології аналізу та прогнозування трафіку комп'ютерних мереж.....	101
3.4. Метод короткострокового прогнозування інтенсивності трафіку даних в комп'ютерній мережі та його програмна реалізація.....	102
3.5. Знаходження найкоротшого шляху в графі. Класичний алгоритм Дейкстри (Dijkstra). .....	106
3.6. Використання даних The Opte Project для тестування розробленої інформаційної технології .....	112
3.7. Вдосконалення методу маршрутизації трафіку у вузловому обладнанні комп'ютерної мережі .....	114
3.8. Тестування програмного забезпечення інформаційної технології.....	126
3.8.1. Тестування розробленого програмного забезпечення на зібраних зразках трафіку .....	138
РОЗДІЛ 4 Розроблення методів і засобів адаптивного управління інтенсивністю завантаження буферів вузлового обладнання комп'ютерної мережі.....	143
4.1. Розроблення моделі пристрою адаптивного управління трафіком комп'ютерної мережі для ефективного впровадження інформаційної технології.....	143
4.2. Експериментальне дослідження трафіку в комп'ютерних мережах .....	147

4.3. Порівняння розробленого методу прогнозування з методом, заснованим на обчисленні похідних.....	154
4.4. Характеристика програмного забезпечення для комп'ютерного імітаційного моделювання роботи мережі .....	162
4.5. Тестування розробленого методу прогнозування інтенсивності трафіку комп'ютерних мереж для дослідження характеристик комп'ютерної мережі.....	164
ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ.....	177
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	179
ДОДАТОК 1. Список публікацій здобувача за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації.....	182
ДОДАТОК 2 Вибірки трафіку на вузлах кафедри АСУ НУ«ЛП» та ІТАІ PAS.....	199
ДОДАТОК 3 Частина програмного коду розробленого ПЗ.....	201
ДОДАТОК 4 Акти впровадження результатів дисертаційних досліджень .....	205

**ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ**

АРМ – Автоматизоване робоче місце

МГП – Марковський груповий потік

НДРКС – Нелінійні диференціальні рівняння коливних систем

ОС – Операційна система

ПЗ – Програмне забезпечення

СМО – Система масового обслуговування

ТМО – Теорія масового обслуговування

AIM – AOL Instant Messenger – Програма миттєвого обміну повідомленнями, запропонована фірмою AOL (America OnLine)

ATM – Asynchronous Transfer Mode

ВМАР – Batch Markovian Arrival Process

СЕТ – Central European Time

CSS – Cascading Style Sheets

CSV – Comma-Separated Values

DNS – Domain Name System

FDDI – Fiber Distributed Data Interface

GNU – GNU's Not UNIX

GPL – General Public License

GTK+ – The GIMP ToolKit +

GTK+3 – The GIMP ToolKit +v.3

HTML – HyperText Markup Language

HTTP – Hyper Text Transfer Protocol

HMM – Hidden Markov Model

ICQ – I Seek You – Вид віртуального спілкування

IDE – Integrated Development Environment

IDS – Intrusion Detection System

IEEE – Institute of Electrical and Electronics Engineers

IM – Instant Messaging – Система обміну миттєвими повідомленнями

IP – Internet Protocol

ISAKMP – Internet Security Association and Key Management Protocol

ITAI PAS – Institute of Theoretical and Applied Informatics Polish Academy of Sciences

JS – JavaScript

LAN – Local Area Network

MAN – Media Access Control

MSN – Microsoft Network

NG – Next Generation

OS – Operating System

OSI – Open Systems Interconnection Basic Reference Model

OSPF – Open Shortest Path First

.pcap – спеціальний формат файлів бібліотеки Packet Capture

PH – PHase

PHP – Hypertext Preprocessor

PPP/HDLC – Point-to-Point Protocol/ High-Level Data Link Control

RIP – Routing Information Protocol

SSL – Secure Sockets Layer

TCP – Transmission Control Protocol

TLS – Transport Layer Security

TTY – TeleTYpe (В значенні режиму)

TX – Twisted Pair X (неекранована кручена пара)

USB – Universal Serial Bus

WAN – Wide Area Network

WEP – Wired Equivalent Privacy

WiMAX - Worldwide Interoperability for Microwave Access

WPA – Wi-Fi Protected Access

XML – Extensible Markup Language



## ВСТУП

**Актуальність теми.** Теорія та практика дослідження комп'ютерних мереж вимагає особливої уваги, оскільки тільки надійне, своєчасне транспортування інформаційних потоків є фундаментом інформаційно розвинутого суспільства.

Телекомунікаційні системи на сучасній стадії розвитку трансформувались у складну та неструктуровану мережу, що здійснює передавання даних між серверами та клієнтами за допомогою різнотипного вузлового обладнання, зокрема маршрутизаторів та комутаторів міток. Постійне зростання кількості інформації у світі призводить до збільшення завантаження телекомунікаційних систем, комп'ютерних мереж в цілому.

Тому необхідним завданням на сьогоднішній день є проведення аналізу переваг та недоліків особливостей функціонування сучасних комп'ютерних мереж, їх архітектури та структури, а також різних методів адаптивного управління вузловим обладнанням таких мереж, розвитку методів прогнозування інтенсивності трафіку, методів маршрутизації та перенаправлення потоків даних в комп'ютерних мережах.

Класичні підходи в теорії мереж базуються на припущеннях, що вхідні потоки є стаціонарними, тобто фактично є суперпозицією дуже великої кількості незалежних стаціонарних потоків. Розглядаючи телефонні мережі з каналною комутацією, можна стверджувати, що таке припущення також буде для них справедливим. Однак дослідники стверджують, що трафік в сучасних комп'ютерних та телекомунікаційних мережах з комутацією пакетів має особливу структуру, яка не дає змоги використовувати при моделюванні стандартні методи, які базуються на марковських моделях та формулах Ерланга. Ці моделі не враховують ефект самоподібності трафіку, тобто в реалізації завжди наявна певна кількість достатньо сильних коливань на фоні низького середнього рівня загального трафіку. Це явище спричиняє збільшення втрат пакетів з даними, затримок їх передавання при проходженні такого трафіку через комп'ютерну мережу.

Значний внесок у розвиток теорії трафіку, систем управління в телекомунікаціях здійснили В.К. Стеклов, Б.Я. Костік, Л.Н. Беркман, комп'ютерних

мереж та адаптивного управління зробили М.Л. Бірюков, М.М. Климаш, Г.Ф. Конахович, Ю.А. Кочергін, у розроблення різних механізмів прогнозування трафіку вклад зробили Г.А. Кучук, О.О. Можаяєв, О.В. Воробйов, В.М. Вишневський, Т. Чахурські, у теорію створення та планування комп'ютерних мереж Е. Таненбаум, В.Г. Оліфер та Н.О. Оліфер, Є.В. Буров, Б.А. Демида, К.М. Обельовська, І.В. Демидов та інші науковці. Беручи до уваги щораз швидші темпи розростання комп'ютерних мереж, збільшення кількості користувачів та щораз більше проникнення інформаційних технологій у життя та діяльність людини, виникає потреба розроблення нових методів, моделей та засобів для аналізу та прогнозування інтенсивності трафіку, адаптивного управління вузловим обладнанням комп'ютерних мереж для зменшення затримок пульсацій передавання трафіку.

Таким чином, актуальним науковим завданням є розроблення моделі та методів прогнозування та перерозподілу трафіку з метою зменшення часових затримок передавання даних.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Тема дисертаційної роботи затверджена 30 квітня 2015 року Вченою радою Національного університету «Львівська політехніка» (протокол №12). Дисертація відповідає науковому напрямку кафедри автоматизованих систем управління «Методи, моделі та компоненти інформаційних управляючих систем і технологій». Дисертаційна робота виконана на базі кафедри автоматизованих систем управління НУ «Львівська політехніка» у рамках таких держбюджетних науково-дослідних робіт: «Технологія підвищення графічного рівня захищеності друкованих та електронних документів» (№ державної реєстрації 0115U004704), «Інтелектуальні інформаційні технології багаторівневого управління енергоефективністю регіону» (№ державної реєстрації 0117U1004450) та спільного україно-австрійського науково-дослідного проекту «Моделювання трафіку та телекомунікаційних мереж» (номер держреєстрації 0117U001612).

**Мета і завдання дослідження.** Метою дисертаційної роботи є зменшення часових затримок передавання даних шляхом розроблення інформаційної технології аналізу та прогнозування трафіку в комп'ютерних мережах.

Досягнення цієї мети забезпечує розв'язання таких завдань:

1. Провести аналіз методів та засобів моделювання та прогнозування трафіку в комп'ютерних мережах, а також моделей опису трафіку комп'ютерної мережі.
2. Розробити предметно-орієнтовану математичну модель трафіку.
3. Розробити метод короткострокового прогнозування інтенсивності трафіку комп'ютерної мережі.
4. Вдосконалити метод маршрутизації трафіку комп'ютерної мережі у вузловому обладнанні.
5. Здійснити програмну реалізацію розроблених методів короткострокового прогнозування інтенсивності трафіку та методу маршрутизації трафіку у вузловому обладнанні.
6. Розробити структурно-функціональну модель інформаційної технології аналізу та прогнозування трафіку в комп'ютерних мережах.
7. Здійснити комп'ютерне імітаційне моделювання функціонування розроблених методів.

*Об'єктом дослідження є процес передавання даних у комп'ютерних мережах.*

*Предметом дослідження є методи моделі аналізу та прогнозування трафіку у вузловому обладнанні комп'ютерних мереж.*

**Методи дослідження.** При виконанні досліджень дисертаційної роботи, формуванні математичної моделі та баз даних трафіку, створенні інформаційної технології використано: теорію та методи управління трафіком в комп'ютерних мережах – для аналізу трафіку комп'ютерних мереж, моделей трафіку; теорію диференціальних рівнянь, методи математичного аналізу, математичної логіки та теорії операторів, теорію спеціальних функцій, чисельні методи, методи оптимізації, методи наближених обчислень, теорію графів, теорію алгоритмів, елементи об'єктно-орієнтованого програмування, функційного програмування, лямбда-

числення для програмної реалізації розроблених методів та алгоритмів для опрацювання результатів.

**Наукова новизна одержаних результатів** полягає у зменшенні часових затримок передавання даних шляхом розроблення інформаційної технології аналізу та прогнозування трафіку в комп'ютерних мережах. При цьому отримано такі наукові результати:

- Вперше розроблено предметно-орієнтовану математичну модель трафіку, яка на відміну від інших побудована на основі диференціальних рівнянь коливного руху з одним ступенем вільності, що забезпечує підвищення точності результатів моделювання.
- Вперше розроблено метод короткострокового прогнозування інтенсивності трафіку, який за рахунок використання концепції фрактальності трафіку підвищує точність прогнозу значень трафіку.
- Удосконалено метод маршрутизації трафіку у вузловому мережному обладнанні, який ґрунтується на прогнозуванні інтенсивностей пульсацій потоку даних та використовуючи існуючу інформацію про маршрути, забезпечує їх корекцію та зменшує навантаження буфера вузлового обладнання та джиттер трафіку у процесі передавання даних.
- Отримав подальший розвиток метод перерозподілу трафіку, який за рахунок прогнозування інтенсивностей пульсацій потоку даних, забезпечує мінімізацію джиттера трафіку комп'ютерній мережі.

**Практичне значення отриманих результатів.** Розв'язання сформульованих завдань дає змогу аналізувати та моніторити вхідний трафік на будь-якому вузловому обладнанні комп'ютерної мережі, здійснювати аналіз зразків трафіку та здійснювати короткострокове прогнозування завантаженості вузлового обладнання та покращувати адаптивне управління вузловим обладнанням у мережі.

Метод короткострокового прогнозування інтенсивності трафіку, а також удосконалений метод маршрутизації трафіку у вузловому обладнанні є придатними для використання у вузловому обладнанні комп'ютерних мереж. Інтенсивність

завантаження буферів вузлового обладнання було знижено на 14 – 15% шляхом його обслуговування в умовах прогнозованого перевантаження такого обладнання.

**Особистий внесок здобувача.** Усі наукові результати дисертаційної роботи отримані автором самостійно. Одноосібно опубліковані праці – [70,71,72]. У працях, опублікованих у співавторстві, автору належать: дослідження аналізатора мережевих протоколів Wireshark та збір зразків трафіку [19, 95]; метод маршрутизації трафіку в комп'ютерній мережі [22]; порівняння зразків значень реального трафіку, зібраного за допомогою аналізатора мережевих протоколів Wireshark та значень прогнозованого трафіку комп'ютерних мереж [23]; алгоритм порівняння значень Ateb-функцій та значень зразків реального трафіку комп'ютерної мережі [24]; розроблення програмного забезпечення для інформаційної технології аналізу та прогнозування трафіку в комп'ютерній мережі [25, 94]; збір та аналіз параметрів отриманих зразків трафіку комп'ютерної мережі [26]; аналіз та вибір критеріїв ефективного використання вузлового обладнання [27]; аналіз типів атак в комп'ютерній мережі та вивчення можливостей вдосконалення аналізаторів мережевих протоколів [37]; участь у розробленні версії аналізатора трафіку для моніторингу комп'ютерних мереж в операційній системі Ubuntu [38]; розроблення алгоритму функціонування блоку прогнозування [51]; комп'ютерна імітаційна модель методу прогнозування значень трафіку на основі теорії Ateb-функцій [99]; розроблення програмного забезпечення для дослідження шумоподібних сигналів [101, 97, 98]; функція аналізатора трафіку для дослідження параметрів тренду трафіку [99]; участь у розробленні моделі малих збурень на основі Ateb-функцій та проведення експериментів з різними типами малих збурень в коливних системах, аналіз отриманих результатів [100]; адаптація асимптотичного методу для опису трафіку в комп'ютерних мережах [99, 111]; порівняння значень реального та прогнозованого трафіку комп'ютерної мережі кафедри АСУ НУ «ЛП» у розробленому автором аналізаторі трафіку [107];

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення та результати роботи були представлені та обговорені на засіданні кафедри автоматизованих систем управління Національного університету «Львівська політехніка» (2014 – 2016рр.);

доповідались на міжнародних та всеукраїнських конференціях, а саме: Computer Networks (CN) (Lwówek Śląski, Poland, 2016); The 11th International Scientific and Technical Conference of Computer Sciences and Information Technologies (CSIT 2016) (Lviv, 2016); Intellectual decision-making systems and problems of computational intelligence (ISDMCI 2016) (Zaliznyi Port, 2016); Free/Libre and Open-Source Software (FOSS 2016) (Lviv 2016); The XIIth International Conference „Perspective Technologies and Methods in MEMS Design” (MEMSTECH’2016) (Polyana, 2016); Сучасні інформаційні технології в економіці, менеджменті та освіті” (CITEM-2015) (Львів, 2015); The 10th International Scientific and Technical Conference of Computer Sciences and Information Technologies (CSIT 2015) (Lviv, 2015); Intellectual decision-making systems and problems of computational intelligence (ISDMCI 2015) (Kherson, 2015); Free/Libre and Open-Source Software (FOSS 2015) (Lviv 2015); 13th International Conference on Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics (CADSM) (2015, Polyana); підсекція «Інформаційні управляючі системи і технології» 72-ої науково-технічної студентської конференції (Львів, 2014); The Xth International Conference „Perspective Technologies and Methods in MEMS Design” (MEMSTECH’2014) (Polyana, 2014); Computer Networks (CN) (Lwówek Śląski, Poland, 2013); The IXth International Conference „Perspective Technologies and Methods in MEMS Design” (MEMSTECH’2013) (Polyana, 2013).

Матеріали дисертації регулярно доповідались та обговорювались на наукових семінарах кафедри автоматизованих систем управління Національного університету «Львівська політехніка».

**Впровадження результатів роботи.** Результати роботи впроваджені в рамках науково-дослідної роботи, яка була виконана на кафедрі АСУ Національного університету «Львівська політехніка» спільно з Інститутом теоретичної та прикладної інформатики Польської Академії Наук у м. Глівіце та у роботі ПП «Цифрові технології», а також при виконанні спільного україно-австрійського науково-дослідного проекту «Моделювання трафіку та телекомунікаційних мереж» та у навчальному процесі кафедри «Автоматизовані системи управління» Національного університету «Львівська політехніка».

**Достовірність результатів.** Для перевірки достовірності отриманих результатів проведено експериментальні дослідження з метою вирішення наступних завдань: 1) отримання та статистична обробка зразків навантаження трафіком інтернет-вузлів кафедри АСУ НУ «ЛП» та Інституту теоретичної та прикладної інформатики Польської академії наук (м. Глівіце) з метою визначення різнотипних залежностей між параметрами вибірок цих зразків та оцінками статистичних характеристик трафіку, а також перевірки адекватності розробленої математичної моделі трафіку згідно реальних умов функціонування інтернет-вузлів; 2) оцінювання впливу розроблених засобів прогнозування трафіку на якість адаптивного розподілення ресурсів вузлового обладнання; 3) оцінка якості адаптивного управління таким розподілом. Виконано комп'ютерне імітаційне моделювання запропонованої інформаційної технології аналізу та моделювання трафіку комп'ютерної мережі. Вхідними даними для здійснення досліджень були усереднені вибірки зразків типового навантаження трафіком, що були експериментально отримані на інтернет-вузлах кафедри АСУ НУ «ЛП» та Інституту теоретичної та прикладної інформатики Польської Академії Наук (м. Глівіце). Результати випробувань свідчать про коректність програмної реалізації розробленої інформаційної технології. Результати моделювання у достатній мірі корелюють із результатами теоретичного дослідження, що відображено у дисертаційній роботі.

**Публікації.** Основні положення та результати дисертаційного дослідження викладено в 16 наукових публікаціях, наведених в авторефераті серед них 4 статті у зарубіжних журналах, які включено до міжнародних наукометричних баз, 5 статей у наукових фахових виданнях України з технічних наук (з них 4 включено до міжнародних наукометричних баз); 5 публікацій у збірниках праць міжнародних конференцій, а також 1 патент на корисну модель та 1 свідоцтво про авторське право на комп'ютерну програму.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертаційна робота складається з вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел із 131 найменування. Робота викладена на 214 сторінках, містить 160 сторінок основного тексту, 93 рисунки та 20 таблиць. Дисертація містить 4 додатки, розміщених на 20 сторінках.

## РОЗДІЛ 1

### АНАЛІЗ МЕТОДІВ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ПРОГНОЗУВАННЯ ПЕРЕДАВАННЯ ТРАФІКУ В КОМП'ЮТЕРНИХ МЕРЕЖАХ

У першому розділі здійснено дослідження методів прогнозування та моделювання трафіку в комп'ютерних мережах, які використовуються на розробляються на сьогоднішній день провідними науковцями світу. Сформульоване завдання створення інформаційної технології аналізу та прогнозування, а також адаптивного управління трафіком в комп'ютерних мережах за рахунок прогнозування інтенсивності трафіку та перерозподілу пропускної здатності мережного обладнання.

#### **1.1. Аналіз та порівняння перспектив росту завантаженості комп'ютерних мереж**

Комп'ютерна мережа є системою для розподіленого опрацювання інформації, яка складається хоча б з двох вузлів (комп'ютерів), які взаємодіють між собою за допомогою різноманітних засобів зв'язку, що повинні забезпечувати надійне передавання інформації між вузлами цієї мережі [42, 66 – 68].

Сучасні комп'ютерні мережі [18] будуються в структурованому вигляді, який відповідає певній архітектурі. Загалом, під архітектурою комп'ютерної мережі розуміють концепцію зв'язку елементів складних систем.

Для організації обміну даних через комп'ютерну мережу потрібно забезпечити виконання нею різноманітних функцій. Серед функцій, що реалізовані в комп'ютерних мережах, можна виокремити наступні: передавання сигналів у лінії зв'язку; приймання сигналів з лінії; виявлення помилок, які трапилися при передачі, та їх виправлення; управління потоком в ланці передавання даних; знаходження маршруту передавання; управління потоками в мережі; організація, підтримка та ліквідація сеансів зв'язку; захист даних; автентифікація; стиснення даних; забезпечення інтерфейсу користувач-мережа; взаємодія прикладних процесів.



Однією з найбільш актуальних проблем дослідження характеристик комп'ютерних мереж є адекватне врахування всіх особливостей потоків їхнього трафіку.

Мережевий трафік чи Інтернет-трафік є обсягом інформації, який передається через комп'ютерну мережу за певний інтервал часу.

Терміном «трафік» позначають кількість інформації або кількість пакетів, що передаються за визначену одиницю часу [28]. В свою чергу, пропускну здатністю є обмеження трафіку, яке існує в залежності від програмного та апаратного забезпечень на ділянці телекомунікаційної мережі [29].

Кількість (об'єм) трафіку вимірюється як в пакетах, так і у бітах, байтах та їхніх похідних одиницях: кілобайтах (Кб), мегабайтах (Мб) та ін. Цей термін власне і характеризує інтенсивність використання комп'ютерної мережі [28].

Трафік в свою чергу поділяють на:

1. Вхідний (інформація, яка надходить в мережу);
2. Вихідний (інформація, яка виходить з мережі);
3. Внутрішній (в межах певної мережі, найчастіше локальної);
4. Зовнішній (за межами певної мережі, найчастіше – Інтернет-трафік).

Отже, перш за все постає завдання проведення аналізу недоліків та переваг сучасних методик опису комп'ютерних мереж, їхньої архітектури та структури, особливостей функціонування, а також різних методів прогнозування інтенсивності трафіку, алгоритмів маршрутизації та перенаправлення потоків даних в таких комп'ютерних мережах.

Більшість робіт [13, 17] докладно розглядають різні типи комп'ютерних мереж (LAN, WAN, і.т.д), архітектурні принципи їхньої побудови, моделі взаємодії таких мереж та протоколи таких взаємодій, різноманітні мережеві технології, а також, звісно, операційні системи комп'ютерних мереж. Крім цього у [42, 67] працях розглядається планування та проектування мережі, а також планування керування її роботою.

Крім цього, у роботах [35, 66, 109], які розглядають комп'ютерну мережу як систему масового обслуговування, також детально описується теорія

повнодоступних та неповнодоступних систем масового обслуговування мереж та потоків в графах.

Опрацювання наукових джерел показує, що існує дуже багато підходів до опису як архітектурних особливостей, так і функціонування комп'ютерних мереж, кожен з яких містить в собі ті чи інші недоліки [112]. Це вказує на потребу створення нових альтернатив, які дадуть змогу краще описати функціональні особливості комп'ютерних мереж різних видів.

Крім цього, [2, 44] було розроблено різні механізми прогнозування трафіку, однак було показано лише те, як розроблений прогноз впливає на роботу вузла комп'ютерної мережі, проте було недостатньо досліджено, який вплив здійснює створений прогноз на роботу комп'ютерної мережі в цілому.

Таким чином, це підтверджує актуальність створення методів прогнозування інтенсивності трафіку та прийняття рішень для адаптивного управління трафіком комп'ютерних мереж. Прогнозування інтенсивності завантаження вузлового обладнання мережі дозволяє забезпечити надійність її роботи, раціональне використання ресурсів мережі, забезпечити ефективне адаптивне управління її обладнанням.

Мережі є невід'ємною частиною бізнесу, освіти, державного управління та домашніх комунікацій. Багато побутових, ділових а також мобільних IP-мереж розвиваються в основному за рахунок комбінації відеотрафіку, трафіку соціальних мереж та сучасних додатків для спільної роботи, які носять назву візуальної мережі.

Розроблення методу для прогнозування інтенсивності трафіку в комп'ютерних мережах націлено на покращення роботи її складових компонентів, зокрема комутаторів, маршрутизаторів та комутаторів міток різних видів. Для підтвердження актуальності та корисності створення такого методу необхідно встановити об'єми трафіку, які передаються через комп'ютерну мережу. Наступним кроком необхідно оцінити ймовірне зниження завантаженості такої мережі та прийняти рішення про потрібність такого методу.

Враховуючи об'єми статистичної інформації, яку необхідно дослідити, на жаль, не є можливим провести таке дослідження самостійно без використання апаратних засобів для збору інформації такого роду на глобальному рівні [9].

Тому за основу для обґрунтування проведення досліджень було взято програму збору, обробки та прогнозування розвитку глобального мережевого трафіку Cisco Visual Networking Index. На основі прогнозів корпорації Cisco [79] щодо обсягу трафіку даних до 2020 року на рисунках 1.1- 1.4 було показано його ріст та розподіл за типом, розподіл згідно країн, сегменту, та мережі.

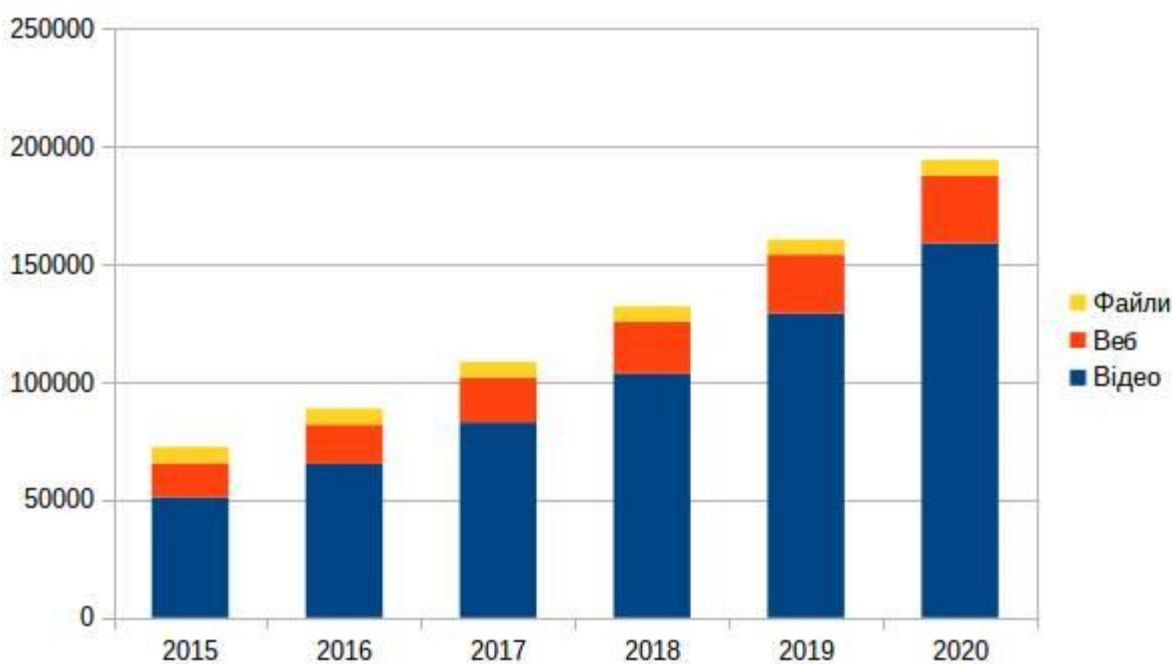


Рис. 1.1 Графік, що відображає кількість трафіку за типом ужитків на період 2015-2020 років.

Приведені статистичні дані показують, що в майбутньому з кожним роком буде зростати потреба у створенні інформаційних технологій різних видів, зокрема інформаційних технологій адаптивного управління, які дадуть змогу ефективно використовувати не лише комп'ютерні мережі для передавання інформації різного роду, а зокрема і ефективно працювати з різномісними даними та метаданими.

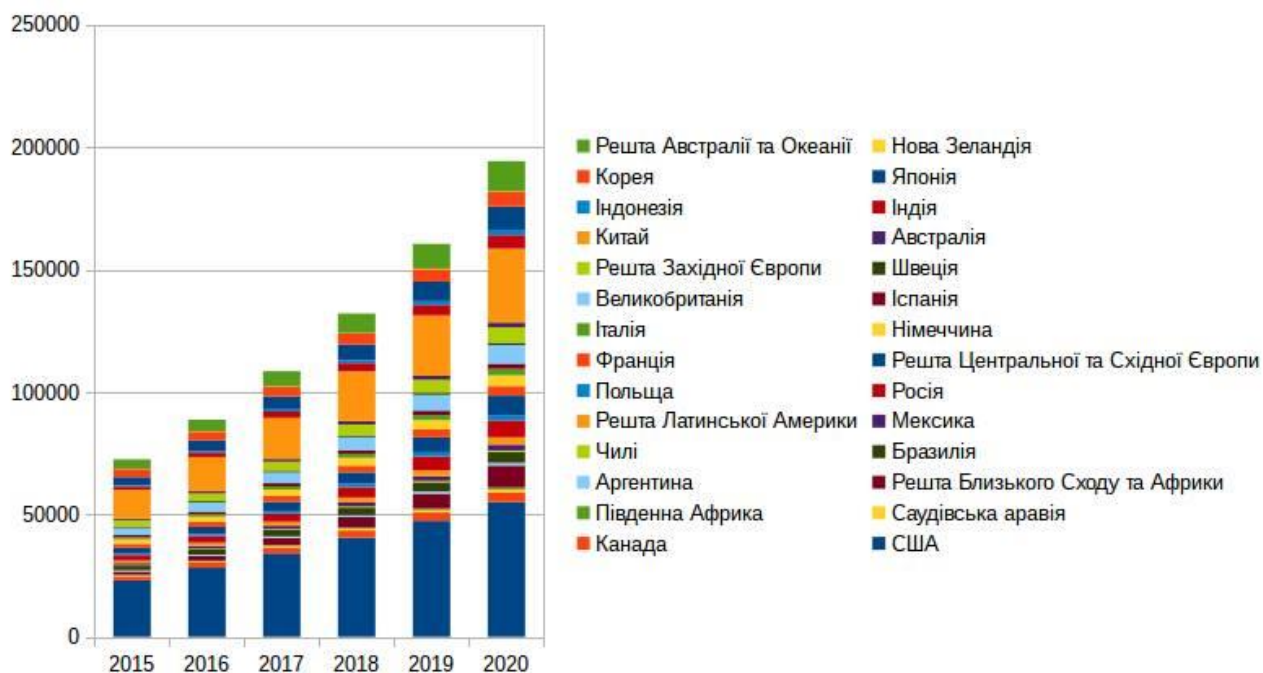


Рис. 1.2 Графік, що відображає кількість трафіку за країнами на період 2015-2020 років.

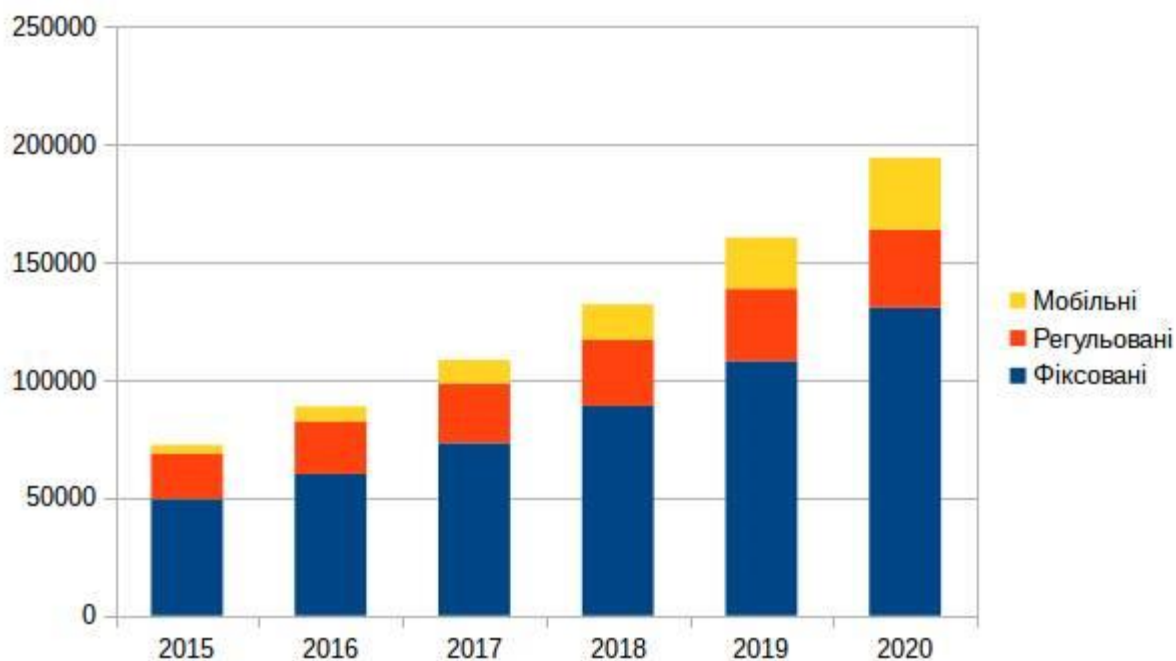


Рис. 1.3 Графік, що відображає кількість трафіку за типом споживання на період 2015-2020 років.

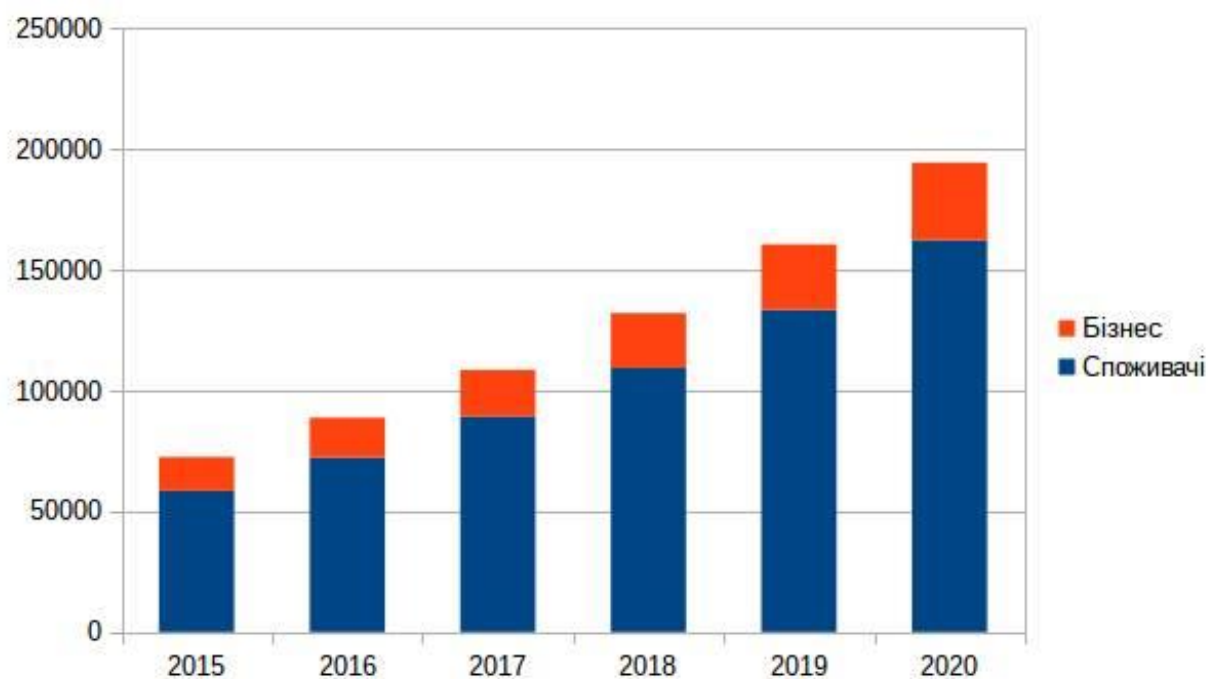


Рис. 1.4 Графік, що відображає кількість трафіку за типом користувачів на період 2015-2020 років.

Згідно наведених вище графіків, можна побачити, що до 2020 року кількість загального трафіку збільшиться в 3 рази порівняно з кількістю трафіку в 2015 році. Збільшення кількості трафіку в свою чергу спричинить зростання навантаження на складові частини комп'ютерної мережі, зокрема на маршрутизатори та комутатори, що може призвести до падіння ефективності їх роботи та спричинити втрати корисної інформації, що негативно позначиться як на роботі комп'ютерних мереж в цілому, так і на щоденній діяльності людини в різних галузях.

Враховуючи стрімке зростання об'ємів трафіку в світовій комп'ютерній мережі стає зрозуміло, що процес передавання даних через надміру завантажені комп'ютерні мережі призведе до втрати інформації. У зв'язку з цим постає завдання розроблення моделі та методів прогнозування та перерозподілу трафіку з метою зменшення часових затримок передавання даних, тим самим забезпечує підвищення ефективності використання мережного обладнання в комп'ютерних мережах.

## **1.2. Аналіз методів моделювання трафіку**

На сьогоднішній день існує багато різноманітних математичних апаратів та методів, котрі застосовуються науковцями для опису трафіку в комп'ютерних мережах різних типів. Зокрема, серед них можна виділити математичну модель опису трафіку як самоподібного процесу, моделювання трафіку на основі теорії динамічного хаосу, математичну модель опису трафіку на основі дифузійних рівнянь, моделювання трафіку за допомогою методів теорії систем масового обслуговування, та різних модифікацій таких моделей. Наступним кроком опишу та проаналізую моделі, котрі найактивніше вдосконалюються сучасними дослідниками.

### **1.2.1. Аналіз методів моделювання трафіку на основі дифузійних рівнянь**

Розробкою моделі трафіку на основі дифузійних рівнянь активно займається школа Інституту теоретичної та прикладної інформатики Польської Академії наук під керівництвом професора, директора Тадеуша Чахурскі, відомого польського науковця.

У своїй роботі [126] він представляє нам метод для оцінки аналітичних характеристик синхронних оптичних пакетно-комутованих магістральних мереж. Запропонований у цій статті спосіб застосовується для мережі з довільною топологією, побудованої з вузлів будь-якого ступеня з будь-яким числом довжин хвиль, а також здатний дозволяти певні відхилення. Спосіб забезпечує не тільки загальні результати, такі як використання волокна, а й детальні результати стосовного того, чим є оцінка переміщення пакетів. Також у цьому дослідженні був проведений аналіз стаціонарної продуктивності мережі, завантаженої незалежними потоками. Справедливим чином на управління доступом визначається стільки пакетів, скільки є доступних вихідних слотів, в той час як алгоритм маршрутизації використовує класи, відстані відхилення і перетворення довжини хвилі. Вчені [126] порівнюють результати свого методу з результатами моделювання для великого

набору випадково згенерованих тестів, та стверджують, що запропонований метод дає досить точні результати.

Моделювання мережного трафіку на основі теорії дифузії вже на сьогодні – велика область знання [88]. Ця робота не охоплює всі результати: вона представляє в узгодженому вигляді підхід, який автори прийняли і використовували в аналізі ряду моделей щодо оцінки деяких механізмів контролю трафіку в комп'ютері, особливо в АТМ мережах. Дифузійне наближення, представлене з інженерної точки зору, підкреслюючи його корисність та коментуючи чисельні проблеми його реалізації. Дифузійне наближення є методом для моделювання поведінки черги на одному вузлі мережі або поведінки черг в усій мережі. Це дозволяє включити в модель загальний час обслуговування, загальні (також корельовані) вхідні потоки та досліджувати перехідні стани. У сучасних мережах представляє інтерес дослідження присутності пульсуючих потоків (наприклад, мультимедійних трансфертів), що дозволяє реалізувати дана модель.

У роботі [75] показано той факт, що одночасне завантаження з декількох віртуальних машин або мережевих пристроїв здійснює велике навантаження на мережеву інфраструктуру. У великій мережі, яка складається з багатьох віртуальних машин, координація перезавантажень та реєстрації пристрою не є потрібною. У статті представлена проста аналітична модель обчислювального розподілу часу завантаження, яка перевіряється в порівнянні з імітаційною моделлю і забезпечує аналіз впливу кількох параметрів на загальний час завантаження під час перевантаження в мережі.

Використання дифузійного наближення в перехідному аналізі моделей черг, які застосовуються для дослідження деяких аспектів передавання даних в Інтернеті розглядається у роботі [84]. У класичній теорії масового обслуговування аналіз перехідних станів є складним і практично не виходить далеко за рамки черги M/M/1 (найпростіша СМО з марковським процесом надходження та обслуговування заявок з безперервним часом і одним каналом обслуговування) та її модифікацій. Проте потоки в комп'ютерних мережах залежать від часу і особливо в Інтернеті, потрібно зосередити наше зацікавлення на аналізі перехідних станів, який є необхідним для

визначення динаміки ТСР потоків, які співпрацюють з чергою активного управління або для того, щоби побачити зміни пріоритетних черг, які забезпечують диференційовану якість обслуговування (Quality of Service). З використанням різних моделей, тут [84] представлено потенціали дифузійного наближення і порівняння його з альтернативними методами: марковські рівняння, які вирішуються чисельно, наближення на основі потокового (fluid-flow) моделювання.

На основі попередніх досліджень була представлена модель ТМО для оцінки ефективності великої системи бази даних в страховій компанії. Система включає в себе сервер з базою даних та локальну мережу з певною кількістю терміналів, де співробітники компанії працюють з програмами, які вводять документи або отримують їх з бази даних. У роботі [81] висвітлюється модель клієнтської діяльності. Вимірювання були зібрані всередині робочої системи: фази продуктивності додатка кожного користувача були визначені і їх тривалість вимірювалася. Зібрані дані використовувалися для побудови синтетичної моделі програми діяльності, яка потім застосовувалася для передбачення поведінки системи в разі зростання числа користувачів. Автори [81] застосовували моделювання, марковські та дифузійні моделі, їх порівняння, засноване на реальних даних, що дозволило краще верифікувати корисність конкретних методів.

Використання прихованих марковських моделей для генерації самоподібного трафіку показано в [92]. Відомі Bellcore-послідовності використовуються як навчальні послідовності для того, щоби визначити параметри НММ (Hidden Markov Model) моделі. Продуктивність підготовленої моделі випробовується на інших частинах послідовностей. Тоді автори [92] використовували навчену НММ з даними Bellcore як вихідну модель трафіку.

Модель дифузійного наближення, яка застосовується для дослідження черги з кінцевою потужністю, представлена у [83]. Зазвичай передбачається, що розмір черги обмежений максимальною кількістю клієнтів, дозволених для системи. Також враховано, що черги пакетів, наприклад, в ІР-маршрутизаторах, де пакети зберігаються обмежений час, та розмір пакетів, є змінними.



Попереднє дослідження було розширено в [85], де була представлена модель дифузійного наближення, яка застосовується для дослідження поведінки пріоритетних черг. Дифузійне наближення дозволяє включити в моделі черг досить загальні припущення. Перш за все це дає дослідникові інструмент для розгляду природним чином перехідних станів черги, що надзвичайно рідко зустрічається в класичних моделях масового обслуговування. Тоді можна розглянути вхідні потоки із загальними проміжними часовими розподілами і серверів з загальним розподілом часу обслуговування. Окремі моделі серверів можуть бути легко включені в мережу черг. Тут [85] автори застосовують формалізм дифузійного наближення для вивчення перехідної та сталої поведінки різних моделей. Моделі можуть бути корисні при оцінюванні ефективності механізмів якості обслуговування, наприклад, в WiMAX, мережах метро і т.д.

У роботі [82] автори запропонували модель для оцінки функції густини ймовірності розподілу часу переміщення пакета в багатоінтервальній бездротовій сенсорній мережі. Модель заснована на дифузійній апроксимації, яка враховує різномірність середовища поширення і розподілу вузлів ретрансляції. Змодельовані параметри системи, наприклад, ймовірність втрати пакетів або топологія мережі, можуть залежати від часу.

Апроксимований аналітичний метод для оцінки ймовірності втрати пакета в синхронних оптичних мережах з комутацією пакетів, які працюють з обмеженим відхиленням маршрутизації за допомогою методу вирішення розбіжностей на основі пріоритетів, представлено в [125]. Пакети губляться, тому що вони отримують занадто багато відхилень і залишаються непомірно довго в мережі. Авторами [125] представлені результати для мережі топології тора двовимірної сітки, яка працює в стійкому стані за рівномірного навантаження. Для мережі, що складається зі 100 вузлів, автори передбачили ймовірність втрат пакетів приблизно рівною  $10^{-9}$ , в той час як симулятор забезпечив результати близько  $10^{-6}$ . У випадках, коли це було можливо, автори [125] верифікували свої результати моделюванням.

Модель дифузійної апроксимації, яка застосовується для дослідження процесу заповнення великого оптичного пакету меншими електронними пакетами, а також

такими, які надходять нерегулярно, представлена в [87]. Використання дифузійної апроксимації дозволяє включити загальний розподіл проміжного часу, також самоподібність процесу введення, так само як і для дослідження перехідних станів. Автори [87] запропонували новий дифузійний процес зі стрибками, який представляє кінець заповнення буфера за рахунок приходу занадто великого пакета, та надають перехідне рішення для цього процесу. Модель дозволяє вивчати розподіл проміжного часу і розподіл об'єму, який займається в оптичному пакеті.

Бібліотека класів, яка написана на C++ і допомагає будувати моделі мереж масового обслуговування, засновані на дифузійній апроксимації, представлена в [86]. Моделі мають форму відкритих мереж з довільною топологією. Залежні від часу і автокорельовані вхідні потоки розглядаються так само, як і залежні від часу розподіли часу обслуговування. В цих рамках інші стадії, пересувні вікна, розсувні вікна, які автори [86] вже підготували і перевірили їхні дифузійні моделі як окремі стадії, які повинні бути включені. Програмне забезпечення особливо добре підходить для аналізу перехідних станів і для оцінки різних алгоритмів керування, які запобігають заторам трафіку в мережах зв'язку.

Дослідження дифузійної моделі трафіку показало, що дана модель фокусується на представленні трафіку та його збурень у вигляді системи масового обслуговування. Однак дана модель є громіздкою, що безпосередньо впливає на якість роботи програмного забезпечення для побудови мереж масового обслуговування, не є цілковито розробленою для випадків, коли необхідним є здійснення прогнозування поведінки трафіку в реальному часі за умови стрімких змін стану комп'ютерної мережі. Крім цього, не було розроблено ніякого програмного середовища для аналізу зразків трафіку за допомогою цієї моделі.

### **1.2.2 Аналіз методів моделювання та прогнозування трафіку на основі теорії масового обслуговування та властивостей самоподібності**

Ще однією проблемою при побудові моделей непуассонівського трафіку, однією з найважливіших, є проблема виділення відповідності між властивостями

трафіку як реалізації цілочислового випадкового процесу і трафіку як послідовності випадкових інтервалів часу між подіями (потоків подій). Вирішення останнього завдання особливо є важливим для теорії масового обслуговування, оскільки весь арсенал розроблених і розроблюваних моделей функціонування мережевих пристроїв базується на другому поданні трафіку.

Теорія масового обслуговування (ТМО) на сьогодні широко застосовується у дослідженні комп'ютерних мереж. Існує багато фундаментальних праць, які дали поштовх для розвитку таких досліджень. Серед них слід виділити роботу [11], у якій викладаються основні моделі теорії масового обслуговування, а також методи їх дослідження, в тому числі і сучасні.

Фундаментальна монографія [30] описує сучасне визначення марковського процесу, а також різні напрямки теорії марковських процесів. Основні теоретичні відомості з різних видів марковських процесів (ланцюги Маркова, марковські послідовності, неперервні, розривні, напівмарковські, змішані та точкові процеси) описано та розглянуто різноманітні завдання, пов'язані з досягненням границь в роботі [69]. Описана методика використання теоретичних результатів для вирішення конкретних завдань з області радіотехніки, автоматики, теорії надійності та масового обслуговування. Детально розглянуто багато прикладів та задач.

Точні й наближені методики дослідження замкнутих, розімкнених і змішаних мереж масового обслуговування, а також ефективні обчислювальні методи та алгоритми розрахунку характеристик таких мереж наводяться у [31]. З позицій теорії мереж масового обслуговування авторами описуються різні аспекти проектування комп'ютерних мереж. Розглядаються стохастичні мережні моделі аналізу затримок, управління потоками і розрахунку вузлів комутації повідомлень (пакетів). Описується застосування моделей мереж масового обслуговування при проектуванні комп'ютерної мережі резервування авіаквитків.

Дослідженням даної тематики на сьогодні також займаються такі вчені як Валентина Кліменок та Александер Дудін з Білоруського Національного університету.

У своїй праці [105] вони мають справу з багатовимірними квазіеліптичними ланцюгами Маркова, встановлюють достатні умови рівноваги і отримують функціональне рівняння матриці для відповідної вектор-генеруючої функції, вирішення якої подається алгоритмічно. Результати показані у вигляді прикладів і додатків в черзі з ВМАР - вводу, які працюють у синхронному випадковому середовищі.

З багатовимірними асимптотичними квазіеліптичними ланцюгами Маркова з дискретним і безперервним часовими характеристиками автори працювали у [104]. Ергодичні та неергодичні умови також були доведені ними. Крім цього, було запропоновано чисельно стійкий алгоритм для розрахунку стаціонарного розподілу. Авторами [104] коротко показано також застосування таких ланцюжків в повторних моделях масового обслуговування з груповим марковським процесом.

У роботі [102] розглядається система масового обслуговування з груповим марковським процесом. Перша стадія представлена мультисерверною системою масового обслуговування з нескінченною орбітою. Показано також загальний вигляд залежності повної інтенсивності для поточного числа клієнтів на орбіті. Друга стадія – це черга декількох серверів з кінцевим буфером і «нетерплячими» клієнтами. Авторами [102] розглянуто та розраховано також стаціонарний розподіл станів системи та основні заходи для продуктивності черги.

Постулат про те, що черги – це адекватні математичні моделі для опису передавання інформації в різних системах зв'язку та мережах, показано в [77]. Описані черги також відіграють важливу роль при перевірці різних алгоритмів декомпозиції, призначених для дослідження більш загальних мереж масового обслуговування. Їх дослідження представляє інтерес для теорії та програмних додатків. У цій роботі [77] автори розглянули особливі черги, які підходять для моделювання систем та мереж, де інформаційні потоки корелюють і появи пакетів, що є типовою для багатьох сучасних телекомунікаційних мереж. Можлива кореляція часу між надходженнями клієнтів та пакетним прибуттям, які враховуються за допомогою розгляду групового марковського процесу у вигляді вхідного потоку в системі. Система складається з двох стадій. Передбачається, що

час обслуговування на стадії 1 зазвичай розподілений. Там немає буфера, і клієнти, які зустрічають завантажений сервер, повторюють свої спроби входу в систему через випадкові інтервали часу. Передбачається, що процес обслуговування на стадії 2 описується безперервним часовим ланцюгом Маркова з обмеженим простором станів. Це припущення є справедливим, наприклад, якщо стадія 2 має кінцевий буфер, містить скінченне число однакових або різнорідних серверів, де передбачається розподіл часу обслуговування типу РН (PHase). Ланцюг Маркова вбудовано в завершення обслуговування на стадії 1 та процес станів системи в довільний момент часу, знаходяться на стадії вивчення. Стан ергодичності та алгоритмічні методики обчислення стійкого стану ймовірності також представлені авторами в роботі [77].

Аналіз СМО, що складається з  $R$  мультисерверних станцій без буферів, проведено в [106]. Вхідний потік у першій стадії є марковським груповим процесом. Клієнти з цього потоку прагнуть, щоби їх обслужили на всіх  $R$  стадіях цієї системи масового обслуговування. Для будь-якого  $r$ -ої стадії, крім транзитних клієнтів, починаючи з  $(r - 1)$ -ої стадії, додатковий МГП (Марковський груповий потік) - потік нових клієнтів приходить на  $r$ -ту стадію безпосередньо, не входячи в попередні стадії. Клієнти з цього потоку бажають обслуговуватись на  $r$ -й стадії і на всіх наступних стадіях. Час обслуговування будь-якого клієнта, що надходять на  $r$ -ту стадію розподілено експоненціально зі швидкістю обслуговування залежно від  $r$ . Автори [106] також представляють рекурсивну схему для розрахунку стаціонарних розподілів та ймовірності втрати.

Дослідження односерверної системи масового обслуговування зі груповим стаціонарним процесом Пуассона, кінцевим буфером та «нетерплячими» клієнтами в якості моделі ТСР короткої передачі здійснено в [103]. Час обслуговування клієнта сервером має експоненційний розподіл. Якщо сервер зайнятий і буфер заповнений на час етапу прибуття клієнта, він може залишити систему назавжди або переміститися на орбіту. Клієнти, які залишаються в буфері, проявляють ознаки нетерпіння: вони можуть залишити буфер, покинувши обслуговування. Час очікування клієнта має експоненційний розподіл. Коли цей час закінчується, клієнт

або взагалі залишає систему, або переходить до орбіти нескінченного розміру. Клієнти, які містяться на орбіті, повторюють здійснення своїх спроб на отримання обслуговування пізніше у випадковій проміжки часу. Цей час розподілено експоненціально зі швидкістю, залежно або незалежно від поточного числа клієнтів на орбіті.

Поведінка розглянутої системи описується двовимірним асимптотичним квазіеліптичним ланцюгом Маркова. Умови стійкості та алгоритми для розрахунку стаціонарного стану розподілу ланцюга також запропоновані авторами [103] у цій роботі. Визначаються та обчислюються також і основні показники діяльності системи.

Мультисерверна СМО зі скінченим буфером, де відбувається груповий марковський процес вивчалась у [111]. Час обслуговування клієнта має фазний розподіл типу (РН). Клієнти допускаються до системи відповідно до впорядкованого часткового допуску, повного допуску та повної відмови. Крім стандартних (позитивних) клієнтів, потік негативних клієнтів також надходить в систему. Випадковим чином негативний клієнт видаляє з системи одного з позитивних клієнтів, які знаходяться на сервері. Стаціонарний розподіл системи сталих ймовірностей, стаціонарного розподілу часу очікування перетворення Лапласа-Стілтєса, основні характеристики продуктивності системи також можна знайти у цій роботі. Крім того, автори [111] навели чисельні приклади.

Розгляд відображення адитивного процесу, що перебуває під контролем ланцюга Маркова в кінцевому просторі станів, зроблено науковцями в [109], де вони визначили кінцеву поведінку розподілу максимуму над регенеративним циклом у випадку з субекспоненціальним приростом. Виходячи з цього, відбувається асимптотичний розподіл працюючого максимуму. Подається також і застосування результатів для марковської модульованої односерверної СМО.

Наукові дослідження різнотипного мережевого трафіку за останні п'ятнадцять років показують, що мережевий трафік є фрактальним за своєю природою. «Самоподібністю» називають властивість процесу зберігати свою поведінку та зовнішні ознаки при розгляді у різному масштабі. Звідси випливає, що методи, які

використовуються для розрахунку та моделювання мережевих систем, були засновані на використанні потоків Пуассона, і не надають цілком повної та точної картини того, які процеси відбуваються в комп'ютерній мережі.

Крім того, самоподібний трафік володіє особливою структурою. Ця структура зберігається при використанні багаторазового масштабування. У реалізації такого підходу, як правило, присутня певна кількість викидів при відносно невеликому рівні трафіку. Дане явище погіршує характеристики (збільшує затримки, джиттер пакетів) при проходженні такого трафіку через вузли комп'ютерної мережі. На практиці це проявляється в тому, що пакети, при високій швидкості їхнього руху через комп'ютерну мережу, надходять на вузол не окремо, а цілою множиною, що може призводити до їх втрат через обмеженість об'ємів буфера, які були попередньо розраховані за класичними методиками.

Описані особливості мережевого трафіку викликали велике зростання публікацій та проведення наукових досліджень за методами аналізу, моделювання та прогнозування такого самоподібного трафіку [39].

У праці [5] авторами було проведено дослідження ряду властивостей реального трафіку в сучасних комп'ютерних мережах з пакетною комутацією. За допомогою використання методу аналізу фрактальної структури часових рядів була продемонстрована самоподібна природа такого мережевого трафіку в різноманітних інформаційних мережах. Також було показано математичну модель генератора трафіку. Ця математична модель відображає мультифрактальну поведінку потоків даних в реальних інформаційних системах, що дає змогу імітувати трафік зі заданими попередньо показниками самоподібності.

Аналіз причин появи самоподібного трафіку, фізичне і математичне моделювання цього процесу а також порівняння результатів одержаних математичних моделей із реальним трафіком показано у статті [43].

Аналіз існуючих моделей трафіку, а саме моделей фрактального броунівського руху, фрактального гауссівського шуму та фрактального руху Леві, авторегресійних, нейромережевих і нейронечітких моделей зроблено у [12]. Авторами визначені недоліки та переваги кожної з таких моделей. Для визначення

характеристик трафіку було використано методику оцінки характеристик трафіку в комп'ютерних мережах, а також комплексний метод ідентифікації, котрі включають фрактальний, статистичний та часо-частотний види аналізу, що дозволяють комплексно класифікувати й оцінити характеристики початкової системи. При моделюванні були використані такі моделі трафіку: лінійна, нейронечітка, нейровейвлетна та нейромережеві адаптивні фільтри-апроксиматори. Побудовані графіки автокореляційних функцій, спектрів і дисперсій експериментальних та модельних сигналів. У якості показника ефективності моделювання була використана відносна середньоквадратична похибка.

Взаємозв'язок різних характеристик випадкового процесу, пов'язаних з ефектом самоподібності розглядається у праці [73].

Огляд деяких досягнень в області самоподібного телетрафіку подано у статті [74]: визначено самоподібний випадковий процес; описана модель самоподібного трафіку пакетів і наведені вирази для асимптотичної ймовірності втрат пакетів в системі зв'язку, яка передає такий тип трафіку.

Метод імітаційного моделювання мережевого телекомунікаційного трафіку, що володіє самоподібними властивостями запропоновано вченими у роботі [56]. Для генерованого трафіку може бути задано параметр Херста, що характеризує самоподібні властивості і одномірний розподіл ймовірностей.

У праці [1] автором показано, що на даний момент, незважаючи на велику кількість публікацій в напрямку досліджень самоподібного трафіку, дефіцит досліджень включає використання моделей для синтезу телекомунікаційних мультисервісних мереж. У зв'язку з цим, ця робота [1] вирішує проблему параметричного синтезу мультисервісної транспортної мережі, де агрегований трафік передається від великого числа користувачів. На основі аналізу публікацій автором [1] були обрані: модель агрегованого трафіку у вигляді дробового броунівського руху; формули для визначення параметрів багатоадресного трафіку, який формується в результаті агрегації декількох потоків; формули для затримки та ймовірності втрат пакетів і запропоновані методи параметричного синтезу мультисервісних телекомунікаційних мереж з використанням цих моделей і формул.



Остання частина статті демонструє розроблений чисельний експеримент, для того, щоби порівняти метод синтезу на основі моделей самоподібних процесів з класичними раніше відомими методами, які засновані на моделях потоку Пуассона. При порівнянні результатів експерименту автором було виявлено, що запропоновані методи дозволяють більш ефективно розподіляти мережеві ресурси, ніж класичні методи, що зменшує середню затримку від 10 до 25% і знижує ймовірність втрати від 12 до 20%.

Дослідження, проведені в роботі [29], підтверджують наявність самоподібних властивостей в трафіку сучасних телекомунікаційних мереж, що використовують у тому числі технології бездротового доступу IEEE 802.11.

Самоподібні властивості проявляють себе в трафіку як на каналному (Fast Ethernet), так і на транспортному (TCP) рівнях. Авторами [54] було показано також і те, що структура трафіку каналного рівня практично повністю визначається трафіком транспортного рівня. З перебігом часу рівень самоподібності (значення параметра Херста для трафіку) змінюється. У трафіку каналного і транспортного рівнів виявлені значні гармонійні складові з частотами 1, 2, 3...Гц. У зв'язку з цим при розробці адекватних математичних моделей телетрафіку слід звертати увагу на присутність періодичних компонент.

Порівнюючи отримані в даній роботі [54] результати з аналогічними результатами для трафіку дротових мереж можна сказати, що, незважаючи на різні принципи функціонування каналного і фізичного рівнів, з точки зору самоподібної структури принципів відмінностей між даними видами трафіку авторами [54] не виявлено.

Дослідження різних типів мережевого трафіку, які показують, що мережевий трафік природньо є самоподібним або фрактальним, тобто в ньому присутні так звані «спалахи» пакетів (пульсації), що спостерігаються в різних часових інтервалах (починаючи від мілісекунд і до хвилин або навіть годин) та існує певна кореляція між пакетами, здійснено у праці [34]. Це означає, що методи моделювання та розрахунку комп'ютерних мереж, котрі базуються на використанні пуассонівських

потоків, та широко застосовуються на даний момент, не дають змогу відобразити точну картину того, що відбувається в мережі.

Крім того, у [34] також проведено аналіз зразків реального трафіку комп'ютерної мережі, за допомогою одного з методів визначення самоподібності. На підставі даних, отриманих під час проведення експериментів, була показана самоподібна природа реального мережевого трафіку. Також було створено модель, яка описує самоподібний трафік з різними ступенями самоподібності та проведено порівняння отриманих результатів з результатами, отриманими для моделі, яка обслуговує системи з пуассонівським типом трафіку.

Самоподібними властивостями також володіє повторне завантаження однотипних даних в найпростішій одноканальній системі передачі даних з повторними вимогами при виконанні класичних припущень, що показано в [33]. Обчислення її фрактальної розмірності дає результати, які задовільно узгоджуються з результатами моделювання.

Також автором [33] розглянуто спосіб обчислення розмірностей Хаусдорфа реалізації корельованого гауссівського випадкового процесу. Далі теоретично і методом імітаційного моделювання досліджена модель радіосистеми з повторними викликами.

Трафік гігабітного Ethernet каналу проявляє самоподібні властивості з досить великим показником Херста, що було досліджено авторами у [41]. Особливу увагу заслуговують області, викликані антропогенним характером, тому що саме в цей час виникає велика ймовірність переповнення буферів пристроїв, що може призвести до виникнення черг в системі і, як наслідок, до різкого погіршення якості обслуговування всього спектру існуючих сервісів, що надаються провайдером послуг зв'язку.

Авторами показано [41] також, що самоподібні властивості трафіку дозволяють з достатнім ступенем достовірності прогнозувати виникнення на сегменті мережі тимчасових періодів з перевантаженням за продуктивністю обладнання та ліній зв'язку, що в свою чергу, робить можливим побудову системи з динамічним управлінням можливої пропускної здатності для окремих видів трафіку.

Своєю роботою вчені [41] підтверджують, що прогнозування відіграє значну роль у розробці алгоритмів, спрямованих на підвищення якості обслуговування.

Види комутації інформаційних потоків в комп'ютерних мережах, методи організації черг всередині вузлів зв'язку, методи маршрутизації та управління інтенсивністю вхідного трафіку розглянуто в роботі [57].

Автором [57] описано математичну модель для відображення самоподібного трафіку, яка дає змогу проводити імітаційне моделювання зі заданими об'ємами буферної пам'яті та заданою пропускнуою здатністю каналів. На основі розробленої моделі було проведено імітаційне моделювання, яке показало можливість керування потоками даних, які надходять з метою обробки на вузол зв'язку. Розроблений підхід заснований на визначенні максимально допустимого навантаження каналу за допомогою моніторингу вхідного трафіку.

Дослідження ситуації показало, що загалом методи моделювання та прогнозування передавання трафіку в сучасних комп'ютерних мережах вивчені та розроблені недостатньо. Це вказує на необхідність розроблення нових моделей та методів для підвищення ефективності використання ресурсів вузлового обладнання комп'ютерної мережі.

### **1.3. Аналіз методів маршрутизації в комп'ютерних мережах**

На сьогодні існує багато різноманітних методів та алгоритмів маршрутизації, використання яких забезпечує правильність роботи вузлового обладнання комп'ютерних мереж, коли мова іде про пошук вузлів призначення відправленої інформації. Серед них можна виділити такі алгоритми:

1. Алгоритм Дейкстри, за яким пошук найкоротших шляхів відбувається від однієї з вершин певного графа до інших та має багато корисних модифікацій.
2. Алгоритм Левіта, що також бере за основу графи, знаходить найкоротшу відстань від однієї з вершин графа до всіх інших, але також працює для графів з ребрами, які мають негативну вагу.

3. Алгоритм Джонсона, який дозволяє знайти найкоротші шляхи між усіма парами вершин зваженого орієнтованого графа. Цей алгоритм працює тільки якщо в графі містяться ребра з негативними та позитивними вагами, але не існує циклів з негативними вагами.
4. Алгоритм Флойда – Уоршела, який є динамічним алгоритмом для знаходження найкоротших відстаней між усіма вершинами зваженого орієнтованого графа.
5. Алгоритм Беллмана – Форда, також відомий як алгоритм RIP (Routing Information Protocol), алгоритм пошуку найкоротшого шляху в зваженому графі з врахуванням ребер з від’ємними вагами.

Використання всіх цих алгоритмів визначається багатьма факторами комп’ютерної мережі, зокрема такими як тип мережі, її структура та архітектура, розміри та її призначення.

Застосування різних мір складності програмного забезпечення (мається на увазі цикломатична складність) для набору алгоритмів найкоротших шляхів показано в [116]. Ідея полягає в тому, щоб вивчити, яку інформацію про такі алгоритми вимірює така складність, яке ПЗ для вимірювання складності є найбільш корисним та проаналізувати, коли порівняння складності алгоритмів програмного забезпечення можуть бути застосовані. Експеримент показує, що застосування цикломатичної складності програмного забезпечення дає новий вимір емпіричного порівняння алгоритму. Результати явно показують, залежність між швидкістю та складністю реалізації, тобто швидший алгоритм, як правило, вимагає більш складної реалізації. Різні міри складності сильно корелюють. Тому навіть прості вимірювання кількості ліній коду дають корисні результати. Оскільки цикломатичну складність програмного забезпечення легко розрахувати та її вимірювання надає багато корисної інформації, дослідження показує, що такі вимірювання повинні бути включені в емпіричні порівняння таких алгоритмів. На жаль, для отримання достовірних результатів, всі алгоритми повинні бути розроблені в однаковому стилі, що робить порівняння незалежних реалізацій складним.

Велике обчислювальне дослідження найкоротших алгоритмів, в тому числі деяких найновіших алгоритмів було проведено в [78]. Авторами було запропоновано нові алгоритми, експериментальні результати та доведено цікаві теоретичні результати, отримані з експериментальних даних. Розрахункове дослідження базувалось на декількох природних класах проблем, зокрема на тому як виявити сильні та слабкі сторони різних алгоритмів пошуку найкоротших шляхів у графі. Ці проблеми класів та реалізації алгоритму формування середовища для тестування продуктивності найкоротших алгоритмів було також описано. Взаємодія між експериментальною оцінкою поведінки алгоритму та теоретичним аналізом продуктивності алгоритму, також була описана.

У працях Обельовської [47, 48] було запропоновано декілька модифікацій алгоритму маршрутизації Дейкстри, зокрема була створена модифікація цього алгоритму з метою зменшення перевантажень ресурсів комп'ютерних мереж, зокрема з врахуванням двох класів трафіку, так і модифікація, що враховує перевантаження вихідних каналів.

Проаналізувавши вищенаведені праці, стало зрозуміло, що існує необхідність створення удосконалення методу маршрутизації, який би враховував інтенсивність трафіку в конкретно даному вузлі комп'ютерної мережі.

Враховуючи особливість поставленої мети у дисертаційній роботі, було обрано розробити удосконалення методу маршрутизації трафіку, який базуватиметься на алгоритмі маршрутизації трафіку Дейкстри, оскільки він є простим у реалізації, що забезпечує високу швидкодію програмного комплексу розробленої інформаційної технології та відповідає поставленій меті зменшення часових затримок передавання даних шляхом прогнозування значень трафіку в комп'ютерних мережах.

#### **1.4 Обґрунтування вибору напрямку досліджень та постановка наукового завдання**

Зі всього вищезазначеного випливає, що для вирішення головного завдання розроблення моделі та методів прогнозування та перерозподілу трафіку з метою

зменшення часових затримок передавання даних, потрібно вирішити ряд локальних завдань, зокрема:

1. Провести аналіз методів та засобів моделювання та прогнозування трафіку в комп'ютерних мережах, а також моделей опису трафіку.
2. Розробити предметно-орієнтовану математичну модель трафіку.
3. Розробити метод короткострокового прогнозування інтенсивності трафіку.
4. Вдосконалити метод маршрутизації трафіку у вузловому обладнанні.
5. Вдосконалити метод візуалізації трафіку в комп'ютерній мережі.
6. Здійснити програмну реалізацію розроблених методів короткострокового прогнозування інтенсивності трафіку та методу маршрутизації трафіку у вузловому обладнанні.
7. Розробити структурно-функціональну модель інформаційної технології аналізу та прогнозування трафіку в комп'ютерних мережах
8. Здійснити комп'ютерне імітаційне моделювання функціонування розроблених методів.

## **Висновки до розділу 1**

1. Досліджено та проаналізовано сучасний стан розвитку комп'ютерних мереж. На основі дослідження та опрацювання глобальних статистичних даних було виявлено, що збільшення кількості всесвітнього мережевого трафіку до 2020 року включно спричинить величезне зростання навантаження на складові частини глобальної комп'ютерної мережі, що може призвести до погіршення ефективності їх роботи та спричинити втрати корисної інформації, що може негативно позначитись на різних галузях людської життєдіяльності.
2. Опрацьовано та проаналізовано різні методи моделювання трафіку в комп'ютерних мережах, серед яких виділено три найвідоміших: моделювання трафіку за допомогою дифузійних рівнянь, методи та моделі, які розглядають трафік як самоподібний процес та модель трафіку як системи масового

обслуговування. Виявлено, що всі ці методи мають свої недоліки та не надають повної інформації про трафік в комп'ютерній мережі.

3. Проаналізовано методи маршрутизації в комп'ютерних мережах, їхні переваги та недоліки. Обґрунтовано вибір методу маршрутизації згідно поставлених завдань.

4. Проаналізовано інструментальні засоби для роботи зі зразками трафіку, зокрема такі як аналізатори трафіку, мережевих протоколів, обґрунтовано та описано їхні основні характеристики та описано обраний інструментарій з метою забезпечення тестування та достовірності отриманих результатів роботи.

## РОЗДІЛ 2

РОЗРОБЛЕННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ТРАФІКУ НА ОСНОВІ  
НЕЛІНІЙНИХ ДИФЕРЕНЦІАЛЬНИХ РІВНЯНЬ КОЛИВНИХ СИСТЕМ З ОДНИМ  
СТУПЕНЕМ ВІЛЬНОСТІ

У другому розділі проведено дослідження нелінійних диференціальних рівнянь коливних систем (НДРКС) з одним ступенем вільності. Розроблено та досліджено математичну модель трафіку у комп'ютерних мережах на основі математичного апарату НДРКС з одним ступенем вільності, розв'язання яких базується на методі усереднення Боголюбова-Митропольського. Показано, що незбурені розв'язки представляються як Атеб-функції. Малі збурення трафіку змодельовано за допомогою функцій Дірака, які є випадковими у появі в часі та яким притаманна випадково обрана амплітуда збурення.

**2.1 Асимптотичний метод Боголюбова-Митропольського для розв'язання нелінійних диференціальних рівнянь коливного руху з одним ступенем вільності**

Автори [10] починають опис методу з викладення формального методу побудови наближених розв'язків для системи диференціальних рівнянь першого порядку з малим параметром в стандартній формі:

$$\frac{dx_k}{dt} = \varepsilon X_k(t, x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (k = 1, 2, \dots, n) \quad (2.1)$$

де  $\varepsilon$  – малий параметр,  $x_k$  – функція координат (одночастотне коливання системи з багатьма ступенями свободи),  $t$  – час, а  $X_k$  може бути представлено за допомогою сум:

$$X_k(t, x_1, x_2, \dots, x_n) = \sum_{\nu} e^{i\nu t} X_{k\nu}(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (k = 1, 2, \dots, n), \quad (2.2)$$

для яких  $\nu$  – постійні частоти.



Рівняння (2.1) розглядаються Боголюбовим [10] виключно в дійсній області, і комплексна форма представлення синусоїдальних коливань, яка застосовується у (2.2), введена ними лише для простоти позначень.

Іноді при розгляді вищих наближень доцільно враховувати в диференціальних рівняннях також члени вищого порядку відносно до  $\varepsilon$ . При цьому отримується, наприклад:

$$\frac{dx_k}{dt} = \varepsilon X_k(t, x_1, \dots, x_n) + \varepsilon^2 Y_k(t, x_1, \dots, x_n) + \dots \quad (2.3)$$

$$(k = 1, 2, \dots, n),$$

де  $Y_k$ - функція того ж виду, що й  $X_k$ . Цей тип рівнянь також називають стандартним. При застосуванні теорії збурень тут не вноситься ніяких суттєвих змін.

Перед тим, як приступити до викладення цієї теорії, було введено ряд скорочених позначень. Так, сукупність  $n$  величин  $x_1, x_2, \dots, x_n$  розглядають як  $n$ -мірний вектор. Тоді рівняння (2.1) записуються у вигляді

$$\frac{dx}{dt} = \varepsilon X(t, x), \quad (2.4)$$

де

$$X(t, x) = \sum_v e^{ivt} X_v(x). \quad (2.5)$$

Рівняння диференціювання складеної функції

$$\frac{dF_k(t, x_1, \dots, x_n)}{dt} = \frac{\partial F_k}{\partial t} + \sum_{q=1}^n \frac{\partial F_k}{\partial x_q} \frac{dx_q}{dt} \quad (2.6)$$

в авторських [10] позначеннях зображено так:

$$\frac{dF}{dt} = \frac{\partial F}{\partial t} + \frac{\partial F}{\partial x} \frac{dx}{dt} = \frac{\partial F}{\partial t} + \left( \frac{dx}{dt} \frac{\partial}{\partial x} \right) F, \quad (2.7)$$

де,  $\frac{\partial F}{\partial x}$  є матрицею виду

$$\left\| \frac{\partial F_k}{\partial x_q} \right\|,$$

у скалярному добутку з вектором  $\frac{dx}{dt}$ , і  $\left(\frac{dx}{dt} \frac{\partial}{\partial x}\right)$  – як операторний скалярний добуток

$$\sum_{q=1}^n \frac{dx_q}{dt} \frac{\partial}{\partial x_q} \quad (2.8)$$

Застосування вказаної матрично-векторної системи позначень має значну перевагу для скорочення запису.

Нехай далі  $F(t, x)$  буде сумою вигляду

$$F(t, x) = \sum_{\nu} e^{i\nu t} F_{\nu}(x) \quad (2.9)$$

Тоді, при введенні позначення

$$\left. \begin{aligned} M_t\{F(t, x)\} &= F_0(x), \\ \tilde{F}(t, x) &= \sum_{\nu \neq 0} \frac{e^{i\nu t}}{i\nu} F_{\nu}(x), \\ \tilde{\tilde{F}}(t, x) &= \sum_{\nu \neq 0} \frac{e^{i\nu t}}{(i\nu)^2} F_{\nu}(x) \end{aligned} \right\} \quad (2.10)$$

Також було [10] отримано тотожності:

$$\frac{\partial \tilde{\tilde{F}}}{\partial t} = \tilde{F}, \quad \frac{\partial \tilde{F}}{\partial t} = F - M_t\{F\} \quad (2.11)$$

Оператор  $\sim$  отримав назву інтегруючого оператора,  $M_t$  – оператора усереднення при постійних  $x$  чи оператором усереднення за часом.

Надалі було розглянуто систему диференціальних рівнянь (2.4), де  $\varepsilon$  – малий параметр, і де вираз  $X$  як функції часу  $t$  представили сумами (2.5).

Форма наближеного розв'язку може бути знайдена, за допомогою наступних міркувань, а саме: оскільки перші похідні  $\frac{\partial x}{\partial t}$  пропорційні малому параметру, природно вважати  $x$  величинами, які повільно змінюються. Отже  $x$  представляється як суперпозиція члена  $\xi$ , який плавно змінюється, та суми малих вібраційних членів і оскільки останні в першому наближенні є малими, припускають, що  $x = \xi$ . Тоді

$$\frac{dx}{dt} = \varepsilon X(t, x) = \varepsilon X(t, \xi) = \varepsilon \sum_v X_v(\xi) e^{ivt}, \quad (2.12)$$

тобто

$$\frac{dx}{dt} = \varepsilon X_0(\xi) + \text{малі синусоїдальні коливні члени.} \quad (2.13)$$

Оскільки ці синусоїдальні коливальні члени викликають лише малі вібрації  $x$  біля  $\xi$  і не впливають на систематичні зміни  $x$ , було записано рівняння першого наближення у вигляді

$$\frac{d\xi}{dt} = \varepsilon X_0(\xi) = \varepsilon M_t\{X(t, \xi)\} \quad (2.14)$$

Для отримання другого наближення необхідно взяти до уваги у виразі  $x$  також і вібраційні члени; враховуючи у (2.13) член  $\varepsilon e^{ivt} X_v(\xi)$ , як такий, що викликає у  $x$

коливання вигляду  $\frac{\varepsilon e^{ivt}}{iv} X_v(\xi)$ , було отримано наступний наближений вираз:

$$x = \xi + \varepsilon \sum_{v \neq 0} \frac{e^{ivt}}{iv} X_v(\xi) = \xi + \varepsilon \tilde{X}(t, x) \quad (2.15)$$

Підставивши (2.15) в рівняння (2.4), отримали:

$$\frac{dx}{dt} = \varepsilon X(t, \xi + \varepsilon \tilde{X}) \quad (2.16)$$

тобто

$$\frac{dx}{dt} = \varepsilon M_t\{X(t, \xi + \varepsilon \tilde{X})\} + \text{малі синусоїдальні коливні члени, звідки,}$$

ігноруючи вплив синусоїдальних коливних членів на систематичну зміну  $\xi$ , отримали рівняння другого наближення

$$\frac{dy}{dx} = \varepsilon M_t\{X(t, \xi + \varepsilon \tilde{X})\} = \varepsilon M_t\left\{X(t, \xi) + \varepsilon \left(\tilde{X} \frac{\partial}{\partial \xi}\right) X(t, \xi)\right\} \quad (2.17)$$

і.т.д.

Обґрунтуємо побудову наближених розв'язків.

Для цього автори в рівняннях (2.17) здійснили заміну змінних [10]

$$x = \xi + \varepsilon \tilde{X}(t, \xi), \quad (2.18)$$

де  $\xi$  розглядають як нові невідомі.

Диференціюючи (2.18), отримали:

$$\frac{dx}{dt} = \frac{d\xi}{dt} + \varepsilon \frac{\partial X(t, \xi)}{\partial \xi} \frac{d\xi}{dt} + \varepsilon \frac{\partial X(t, \xi)}{\partial t}. \quad (2.19)$$

Але зважаючи на властивості (2.11) інтегруючого оператора

$$\frac{\partial \tilde{X}(t, \xi)}{\partial t} = X(t, \xi) - X_0(\xi).$$

Підставляючи (2.18) і (2.19) у рівняння (2.17) отримали:

$$\frac{d\xi}{dt} + \varepsilon \frac{\partial X(t, \xi)}{\partial \xi} \frac{d\xi}{dt} + \varepsilon X(t, \xi) - \varepsilon X_0(\xi) = \varepsilon X\{t, \xi + \varepsilon \tilde{X}(t, \xi)\}$$

або

$$\left\{ 1 + \varepsilon \frac{\partial X}{\partial \xi} \right\} \frac{d\xi}{dt} = \varepsilon X_0(\xi) + \varepsilon \{X(t, \xi + \varepsilon \tilde{X}) - X(t, \xi)\}, \quad (2.20)$$

де 1 розглядається як одинична матриця.

Множачи (2.20) зліва на

$$\left\{ 1 + \varepsilon \frac{\partial X}{\partial \xi} \right\}^{-1}, \quad (2.21)$$

зауважили, що нові невідомі  $\xi$  задовольняють рівнянням вигляду

$$\frac{d\xi}{dt} = \varepsilon \left\{ 1 + \varepsilon \frac{\partial X}{\partial \xi} \right\}^{-1} X_0(\xi) + \varepsilon \left\{ 1 + \varepsilon \frac{\partial X}{\partial \xi} \right\}^{-1} \{X(t, \xi + \varepsilon \tilde{X}) - X(t, \xi)\}. \quad (2.22)$$

З іншої сторони, розклавши (2.21) у ряд за степенями  $\varepsilon$ , отримали:

$$\left\{ 1 + \varepsilon \frac{\partial \tilde{X}}{\partial \xi} \right\}^{-1} = 1 - \varepsilon \frac{\partial \tilde{X}(t, \xi)}{\partial \xi} + \varepsilon^2 \dots,$$

де символ  $\varepsilon^m$  означає величини порядку малості  $\varepsilon^m$ . Тому рівняння (2.22) дають:

$$\frac{d\xi}{dt} = \varepsilon X_0(\xi) + \varepsilon^2 \dots, \quad (2.23)$$

або більш детально

$$\frac{d\xi}{dt} = \varepsilon X_0(\xi) - \varepsilon^2 \frac{\partial X(t, \xi)}{\partial \xi} X_0(\xi) + \varepsilon \{X(t, \xi + \varepsilon \tilde{X}) - X(t, \xi)\} + \varepsilon^3 \dots =$$

$$= \varepsilon X_0(\xi) - \varepsilon^2 \frac{\partial \tilde{X}(t, \xi)}{\partial \xi} X_0(\xi) + \varepsilon^2 \left( \tilde{X} \frac{\partial}{\partial \xi} \right) X(t, \xi) + \varepsilon^3 \dots \quad (2.24)$$

Отже, якщо  $\xi$  задовольняє рівняння (2.23), права частина яких відрізняється від правої частини рівняння

$$\frac{d\xi}{dt} = \varepsilon X_0(\xi) \quad (2.25)$$

на величини другого порядку малості, то вираз

$$x = \xi + \varepsilon \tilde{X}(t, \xi) \quad (2.26)$$

представляє собою точне розв'язання рівнянь (2.4).

Тому Боголюбов та Митропольський [10] прийняли у якості першого наближення

$$x = \xi, \quad (2.27)$$

взявши за  $\xi$  розв'язання рівнянь першого наближення (2.25).

Вираз (2.26), в якому  $\xi$  задовольняє тим же ж рівнянням, вони назвали покращеним першим наближенням.

Підставивши покращене перше наближення в точні рівняння (2.4), нескладно переконатися, що це наближення задовольняє їх з точністю до величин другого порядку малості.

Для ефективної побудови наближеного розв'язку необхідно попередньо розв'язати рівняння першого наближення, і той факт, що ці рівняння (також, як і точні) є диференціальними, накладає певні обмеження на можливість застосування викладеного методу, проте для достатньо великого числа практично цікавих випадків рівняння першого наближення виявляються набагато більш простими та такими, що піддаються дослідженню. При цьому в багатьох випадках, у яких загальний розв'язок не вдається отримати, можна знайти, принаймні, важливі часткові рішення, наприклад, відповідні встановленим коливним процесам.

Так, наприклад, при  $n = 1$  рівняння першого наближення інтегруються в квадратурах; при  $n = 2$  для їх дослідження може бути використана теорія Пуанкаре.

При будь-якому  $n$ , якщо  $X_0(\xi)$  стає в нулем в деякій точці  $\xi = \xi_0$ , було розглянуто «квазістатичне» розв'язання  $x = \xi_0$  рівняння першого наближення. Для

дослідження стійкості цього розв'язку можна скласти рівняння для малих відхилень (рівняння у варіаціях):

$$\frac{d\delta\xi}{dt} = \varepsilon \frac{\partial X_0(\xi_0)}{\partial \xi} \delta\xi \quad (2.28)$$

Якщо усі дійсні частини коренів характеристичного рівняння

$$\text{Det} \left| 1 \cdot p - \varepsilon \frac{\partial X_0(\xi_0)}{\partial \xi} \right| = 0 \quad (2.29)$$

від'ємні, то квазістатичне розв'язання, яке розглядається, виявляється стійким. Будь-яке розв'язання рівнянь першого наближення, яке виходить з початкових значень, близьких до  $\xi_0$ , буде при  $t \rightarrow \infty$  експоненціально наближатися до квазістатичного розв'язку. Якщо хоча б для одного з коренів характеристичного рівняння дійсна частина додатна, маємо випадок нестійкості. Можна натрапити також на критичний випадок, коли усі дійсні частини рівні нулю. Цей випадок іноді можна віднести до двох попередніх за допомогою розглядання вищих наближень.

Як показує покращене перше наближення для описаного квазістатичного рішення,  $x$  представляється у вигляді суми постійного члена і малих синусоїдальних коливань зі «зовнішніми» частотами  $\nu$ . Вищі наближення показали би також наявність членів з комбінаційними частотами, складеними з частот  $\nu$ .

На основі строгої математичної теорії. Боголюбовим та Митропольським показано [10] також, що у випадку, коли дійсні частини коренів характеристичного рівняння (2.29) не дорівнюють нулю, можна встановити при досить загальних умовах, що точні рівняння (2.4) мають майже періодичне рішення  $x = x(t)$  (з частотами з базису  $\nu$ ), яке лежить в околі точки  $x = \xi$ . Цей окіл може бути взято у вигляді як завгодно малим при малому  $\varepsilon$ . Зазначене майже періодичне рішення стійке або нестійке залежно від знаків дійсних частин коренів алгебраїчного рівняння (2.29).

Повертаючись до рівнянь (2.25), вчені зауважують, що за самим визначенням оператора усереднення

$$X_0(\xi) = M_t \{X(t, \xi)\}$$

і, відтак, рівняння першого наближення можуть бути представлені у формі

$$\frac{d\xi}{dt} = \varepsilon M_t\{X(t, \xi)\} \quad (2.30)$$

Таким чином, рівняння першого наближення (2.30) з'являються з точних рівнянь (2.4) шляхом усереднення останніх за часом  $t$ .

Формальний процес, що полягає в заміні точних рівнянь усередненими, і був названий принципом усереднення (асимптотичним методом), який пізніше отримав назву методу усереднення Боголюбова-Митропольського.

## 2.2 Застосування методу усереднення Боголюбова-Митропольського

Аналіз численних робіт вітчизняних і закордонних вчених, які присвятили свої наукові праці коливним процесам, що описуються системами нелінійних диференціальних рівнянь з малим параметром показує, що в основному вони присвячені дослідженню квазілінійних систем. Набагато менше досліджені коливні процеси, які описуються істотно нелінійними диференціальними рівняннями.

Тому у подальшому відбулося широке застосування асимптотичних методів нелінійної механіки та ефективний метод усереднення, які були розроблені та знайшли свій розвиток в працях В.І. Арнольда, Н.Н. Боголюбова, К.Г. Валєєва, В.М. Волосова, В.Г. Коломійця, В.О. Кононенка, Ю.А. Митропольського, А.М. Самойленка та ін. [59]. Крім того, для побудови розв'язків системи двох диференціальних рівнянь з нелінійністю певного типу застосовуються спеціальні еліптичні функції Ляпунова, Якобі та їхні узагальнення.

На сьогоднішній день метод усереднення достатньо широко використовується у різних наукових та технічних галузях. Серед багатьох робіт слід виділити роботу Бігуна [8], яка присвячена розробці й обґрунтуванню схем усереднення для систем диференціально-функціональних рівнянь з повільними та швидкими змінними, які в процесі еволюціонування переміщаються через резонанс. У [8] також було введено резонансне співвідношення для частот, яке прямо залежить від запізнення в швидких змінних. Також було розроблено рівномірні оцінки для осциляційних інтегралів, які відповідають багаточастотним системам у випадках змінного та

сталого запізненнь. Детально розглянуто також і випадок лінійного запізнення. Доведено, що при даних умовах асимптотику оцінок покращити неможливо.

Також вартує звернути увагу на іншу працю Бігуна [7], у якій для  $m$ -частотної системи диференціальних рівнянь із лінійно змінним аргументом доведено існування розв'язку, який задовольняє початкові та багатоточкові крайові умови. Одержано оцінки похибки методу усереднення за швидкими змінними, які явно залежні від малого параметра.

У роботі Петришина та Данилюка [53] показано те, як з допомогою методу усереднення досліджувати вирішувальність крайової задачі для багаточастотної системи з відхиленням аргументом та інтегральними крайовими умовами, а також показано, як отримати оцінку різниці рішень вихідної та усередненої задач.

Метод оптимального управління коливними системами пропонується Заболотновим у [32]. Розглянуті динамічні системи є системами з розподіленими чи зі зосередженими параметрами. Математичними моделями таких систем є системи звичайних диференціальних рівнянь або в часткових похідних. Подібні математичні моделі часто зустрічаються при дослідженні динаміки руху механічних систем, що використовуються в авіаційно-космічній техніці. Також Заболотновим у [32] пропонується застосування загальної форми критеріїв оптимальності, найбільш раціональної для даних систем. Розглядається застосування запропонованого методу для управління двочастотними і одночастотними системами, також наводяться відповідні приклади.

В праці Гребеникова [16] демонструється сукупність математичних методів, що дозволили досліджувати складні нелінійні коливальні системи, які отримали в літературі назву «метод усереднення». Автор також описує в [16] конструктивні частини цього методу, тобто конкретну реалізацію та відповідні алгоритми та алгоритмічні методи, на математичних моделях, досить загальних, але все ж таки побудованих на основі конкретних завдань.

У [36] Князевим показано, що метод гармонічної лінеаризації в системі високого порядку є еквівалентним методу усереднення для деякої системи, що



одержується з вихідної заміною змінних та що критерієм стійкості автоколивань є умова асимптотичної стійкості цієї амплітудної компоненти в усередненій системі.

Семкіним та Смагіним у [61] описано застосування методу усереднення у полях обмінної взаємодії. Крім цього, у [61] також розглянуто і застосування асимптотичного методу для магнетиків на квадратній решітці з анізотропною взаємодією.

Сайком в [58] показано, що усереднення Боголюбова-Митропольського в канонічному формулюванні може бути використано як метод побудови необхідних гамільтоніанів в теорії сильно корельованих електронних систем. Даний метод має ряд переваг перед іншими, а також його можна застосовувати для вирішення великого кола задач в галузі фізики корельованих систем.

Кошляковим у [40] на основі асимптотичного методу було розглянуто стійкість тіла, яке вертикально обертається та підвішене на струні.

### **2.3 Ateb-функції та їх застосування для розв'язання систем нелінійних диференціальних рівнянь з одним ступенем вільності**

Математичні моделі, описані як нелінійні системи диференціальних рівнянь, на сьогодні знаходять своє широке застосування для опису різноманітних технічних та природних процесів [100, 101]. Аналітичне розв'язання таких задач не є можливо здійснити у загальному випадку. Крім того, на сьогоднішній день немає єдиної методики для побудови розв'язків систем нелінійних диференціальних рівнянь. Приступність нелінійностей у цих системах суттєво ускладнює аналітичні дослідження, які пов'язані зі описом, формуванням та визначенням розв'язків систем нелінійних диференціальних рівнянь. Отож, особливе зацікавлення спричиняють ті класи нелінійних систем диференціальних рівнянь, для яких було попередньо створено аналітичні методи дослідження. Саме ті нелінійні системи диференціальних рівнянь, які мають аналітичні розв'язки, і будемо розглядати. Методика побудови розв'язків ґрунтується на застосуванні асимптотичних методів та математичної теорії Ateb-функцій. З метою побудови точних аналітичних

розв'язків нелінійних систем диференціальних рівнянь академіки М.М. Боголюбов та Ю.О. Митропольський застосували метод усереднення, також відомий як метод Боголюбова-Митропольського [10]. Р.М. Розенберг та П.М. Сенік використали цей метод для побудови точних розв'язків певного класу систем диференціальних рівнянь та ввели у розгляд Атеb-функції. Проте згадані автори вивели математичні формули розв'язків, дослідили властивості, але не розробили ефективних методів числового вираження для застосування цих формул у практично важливих задачах.

Атеb-функції, описані Назаркевич у праці [47], дали можливість розв'язати аналітичні системи диференціальних рівнянь, що описують суттєво нелінійні процеси у системах з одним ступенем вільності

$$\begin{cases} \dot{x} + \alpha_1 y^m = 0 \\ \dot{y} + \alpha_2 x^n = 0 \end{cases} \quad (2.31)$$

де  $\alpha_1, \alpha_2$  – деякі дійсні постійні сталі, а

$$n = \frac{2\theta'_1 + 1}{2\theta''_1 + 1}, m = \frac{2\theta'_2 + 1}{2\theta''_2 + 1}, (\theta'_1, \theta''_1, \theta'_2, \theta''_2 = 0, 1, 2, \dots) \quad (2.32)$$

Атеb-функції є оберненням до Beta-функцій. Неповна Beta-функція визначається рівністю

$$B_x(p, q) = \int_0^x t^{p-1} (1-t)^{q-1} dt, \quad (2.33)$$

де  $p$  і  $q$  – дійсні числа.

В частковому випадку, якщо  $x = 1$ , рівняння (2.33) набуде вигляду інтеграла Ейлера першого роду

$$B_1(p, q) = \int_0^1 t^{p-1} (1-t)^{q-1} dt, \quad (2.34)$$

тобто повної Beta-функції.

Для всіх  $x$  з інтервалу  $[0, 1]$  функції  $B_x(p, q)$  і  $B_1(p, q)$ , задані формулами (2.33), (2.34), є додатними та задовольняють умови

$$0 \leq B_x(p, q) \leq B_1(p, q),$$

$$B_x(p, q) = B_1(p, q) - B_{1-x}(p, q).$$

Прийнято розглядати два варіанти, а саме

$$p = \frac{1}{n+1}, q = \frac{1}{m+1}; \quad (2.35)$$

$$p = \frac{1}{n+1}, q = \frac{m}{m+1} - \frac{1}{n+1}, \quad (2.36)$$

де  $m$  і  $n$  визначаються формулами (2.32).

Атеб-функції для значень (2.35), називають періодичними, а для значень (2.36) – гіперболічними (аперіодичними) Атеб-функціями. Система (2.31), якщо  $m, n$  задовольняє співвідношення (2.35), описує коливальний рух, а якщо  $m, n$  задовольняє співвідношення (2.36), – гіперболічний (аперіодичний) рух.

При  $m = 1$ , а  $n$  заданий (2.32), то Назаркевич в [47] показує, що систему (2.31) можна звести до вигляду

$$\ddot{x} + c|x| \cdot x^{\theta-1} = 0 \quad (2.37)$$

де  $\theta$  залежить від параметрів  $\theta'_1, \theta''_1$  в (2.32).

Атеб-функції знайшли своє застосування й у різних галузях науки та інженерії [95]. Зокрема, М.А. Назаркевич досліджує [21] аналітичні розв'язки з допомогою Атеб-функцій для системи диференціальних рівнянь, яка описує коливний рух з одним ступенем вільності, для моделювання застосовує перетворення та розкладання Атеб-функцій в ряди Фур'є і Тейлора. Також було представлено алгоритм та метод обчислення періодичних Атеб-функцій за допомогою побудови розкладів у ряди Фур'є. Розроблений алгоритм можна застосувати з метою числового моделювання руху коливних систем. Проте, М.А. Назаркевич досліджує застосування теорії Атеб-функцій в галузі поліграфії та захисту цінних паперів [19]. У співавторстві було запропоновано метод захисту й ідентифікації поліграфічних документів, який базується на параметрах Атеб-функцій і матрицях Уолша-Адамара. Захист таких документів здійснюється за допомогою методу для накладання фонових сіток, розроблених на основі Атеб-функцій. Крім того, було створено алгоритм методу ідентифікування поліграфічних документів, що полягає у створенні матриць Уолша-Адамара електронного графічного елемента з порівнянням цих матриць в надрукованому поліграфічному документі.

Крім того, у роботі [47] висвітлено нові методи поліграфічного захисту на основі застосування теорії Атеб-функцій. Захищеними від несанкціонованого доступу, копіювання та підроблення будуть як бланки цінних паперів, так і документи. Внаслідок використання розроблених методів захисту документ перетворюється на такий, що містить в собі унікальні елементи цифрового захисту.

Також під час здійснення досліджень було створено методи для знаходження числових розв'язків диференціальних рівнянь із деякою степеневою нелінійністю з допомогою Атеб-функцій, розроблено методи для формування зображень псевдорельєфу, фонових сіток, мікрографіки.

#### 2.4 Застосування нелінійних диференціальних рівнянь коливного руху для моделювання періодичних процесів та поведінки цих систем

Проблематика моделювання періодичних процесів в нелінійних системах, а також проблема побудови та прогнозування роботи таких систем є практично важливими завданнями. Це пояснює актуальність створення нових методик для моделювання поведінки таких систем. Враховуючи дану проблематику, було запропоновано розробити модель нелінійної коливної системи з одним ступенем вільності, рух якої описується з допомогою системи звичайних диференціальних рівнянь першого порядку. Крім того, було запропоновано розв'язати дане завдання моделювання за допомогою застосування теорії Атеб-функцій.

У [62] Сеніком розглянуто нелінійні коливні системи з одним ступенем вільності з малим збуренням, рух яких описується з використанням системи звичайних диференціальних рівнянь першого порядку з малим параметром  $\varepsilon$ .

$$\begin{cases} \dot{y} - \alpha_1 x^n = \varepsilon f(x, y, \mu t) \\ \dot{x} - \alpha_2 y^m = \varepsilon g(x, y, \mu t) \end{cases} \quad (2.38)$$

де  $x, y$  – фазові координати руху точок;  $\alpha_1, \alpha_2$  – сталі причому  $\alpha_1 \alpha_2 > 0$ ;  $\varepsilon f(x, y, \mu t), \varepsilon g(x, y, \mu t)$  – аналітичні  $2\pi$  – періодичні по  $\mu t$  функції;  $n, m$  – числа вигляду  $m = \frac{2\mu_1^{**} + 1}{2\mu_2^{**} + 1}, n = \frac{2\mu_1^{*} + 1}{2\mu_2^{*} + 1}; \mu_1^{**}, \mu_2^{**}, \mu_1^{*}, \mu_2^{*} = 0, 1, 2, \dots$ .

Аналіз руху таких систем ґрунтується на знаходженні частинних розв'язків породжуючої системи. Незважаючи на те, що ці розв'язки не впливають із лінеаризованих рівнянь, їх вдається побудувати за допомогою періодичних Атеб – функцій. Беручи до уваги особливості системи, що розглядається, значною мірою пов'язані труднощі розробки аналітичних методів її дослідження. Найефективнішими методами дослідження коливних процесів нелінійних систем з

малим збуренням є асимптотичні методи нелінійної механіки. Проте отримання асимптотичного зображення розв'язку для системи диференціальних рівнянь (2.31) шляхом його традиційного зображення пов'язане із значними математичними труднощами. Тому розв'язок незбурених рівнянь (2.31) обчислюється при переході до амплітудно – фазових змінних:

$$y = u(a, \varphi), x = v(a, u) \quad (2.39)$$

в яких  $u(a, \varphi)$ ,  $v(a, u)$  - 2П – періодичні по  $\varphi$  ( $\varphi$  - фаза власних коливань), що задовольняють наступні умови:

$$u(a, \varphi)|_{\varphi=k\Pi} = (-1)^k a, \quad v(a, u)|_{u=\pm a} = 0 \quad (2.40)$$

Із першого співвідношення асимптотичного подання (2.39) і умов, накладених на функцію  $u(a, \varphi)$ , випливає що  $a = \max y$ , тому надалі параметр  $a$  - це амплітуда фазової координати  $y$  (амплітуда коливань), а  $\varphi$  - фаза коливань.

Підставляючи розв'язання (2.39) у вихідне незбурене рівняння (2.31), отримаємо систему диференціальних рівнянь для визначення невідомих функцій

$$\begin{cases} \frac{\partial u}{\partial \varphi} \omega(a) - \alpha_1 v^n(a, u) = 0 \\ \frac{\partial v}{\partial u} \frac{\partial u}{\partial \varphi} \omega(a) + \alpha_2 u^m(a, \varphi) = 0 \end{cases} \quad (2.41)$$

Інтегруючи систему диференціальних рівнянь (2.41) за умов (2.40), отримано

$$\begin{cases} v(a, u) = (-1)^k \left( \frac{\alpha_2}{\alpha_1} \frac{n+1}{m+1} (a^{m+1} - u^{m+1}) \right)^{\frac{1}{n+1}} \\ \varphi = 2(r-1)\pi - \frac{\omega(a)}{m} \int_a^U \left( \frac{\alpha_2}{\alpha_1} \frac{n+1}{m+2} (a^{m+1} - u^{-m+1}) \right)^{\frac{n}{n+1}} d\bar{u} \end{cases} \quad (2.42)$$

при

$$\begin{cases} a \geq u \geq -a \\ 2(r-1)\pi \leq \varphi \leq 2r\pi \end{cases} \quad (2.43)$$

$$\varphi = (2r-1)\pi - \frac{\omega(a)}{m} \int_{-a}^U \left( \frac{\alpha_2}{\alpha_1} \frac{n+1}{m+2} (a^{m+1} - u^{-m+1}) \right)^{\frac{n}{n+1}} d\bar{u}$$

при

$$\begin{cases} -a \leq u \leq a \\ (2r-1)\pi \leq \varphi \leq 2r\pi \end{cases} \quad (2.44)$$

де  $k=1$  для  $-a \leq u \leq a$  і  $k=2$  для  $a \geq u \geq -a$ .

Співвідношення (2.43), (2.44) є неявними виразами для знаходження функції  $u(a, \varphi)$ . Дану функцію можна виразити через косинус Атеб – функції у вигляді:

$$u = Ca(m, n, l\varphi) \quad (2.45)$$

В останній залежності  $l$  визначається із умови  $2\Pi$  - періодичності за  $\varphi$  отриманої функції і приймає значення  $l = \pi^{-1}\Pi(n, m)$ .

Аналогічно отримаємо вираз для  $v(a, u)$  через синус Атеб – функції:

$$v(a, u) = a^{\frac{m+1}{n+1}} \left( \frac{\alpha_2}{\alpha_1} \frac{n+1}{m+1} \right)^{\frac{1}{n+1}} Sa(m, n, l\varphi) \quad (2.46)$$

із  $2\Pi$  – періодичності по  $\varphi$  розв'язку незбуреної системи:

$$\omega(a) = \frac{\alpha_1(m+1)\pi}{2} \left( \frac{\alpha_2}{\alpha_1} \frac{n+1}{m+2} \right)^{\frac{n}{n+1}} \Pi(n, m)^{-1} a^{\frac{nm-1}{1+n}} \quad (2.47)$$

Таким чином показано, що динамічні процеси досліджуваних нелінійних систем можна описувати за допомогою Атеб-функцій, частота, а значить період коливань цих сильно нелінійних систем залежить від амплітуди коливань (початкових параметрів руху цієї системи).

## 2.5 Застосування методу Боголюбова-Митропольського для побудови математичної моделі трафіку

Дослідимо та опишемо зміни значень трафіку в комп'ютерній мережі в часі у вигляді нелінійної коливної системи з одним ступенем вільності із малим збуренням. Моделювання трафіку комп'ютерної мережі  $x(t)$  здійснюється за допомогою звичайного диференціального рівняння з малим параметром  $\varepsilon$  як

$$\ddot{x} + \alpha^2 x^n = \varepsilon f(x, \dot{x}, t) \quad (2.48)$$

де  $x(t)$  – кількість пакетів у мережі в момент часу  $t$ ;  $\alpha$  – константа для визначення величини періоду коливання значень трафіку,  $f(x, \dot{x}, t)$  - будь-яка аналітична функція, яка використовується для опису та моделювання незначних відхилень значень трафіку від основної складової коливань,  $n$  – число, яке визначає ступінь нелінійності рівняння та впливає на період основної складової коливань [115].

При виконанні наступних умов на  $\alpha$  і  $n \neq 0$ ,  $n = \frac{2k_1+1}{2k_2+1}$ ,  $k_1, k_2 = 0, 1, 2, \dots$ , доведено [65], що аналітичне розв'язання рівняння (2.48) представляється у вигляді Атеб-функцій. Для розв'язання завдань прогнозування трафіку в комп'ютерній мережі чи телекомунікаційних мережах важливим є вибір типу функції  $f$ , тому що саме тип цієї функції враховує особливості обраної мережі. Спосіб, у якому розглянуто малі збурення як періодичні функції може бути використаний для моделювання мережі з нерізкою зміною інтенсивності трафіку. Однак тут розглянуто збурення у вигляді суми функцій Дірака. Цей опис краще відповідає комп'ютерній мережі з наявними в ній пульсаціями інтенсивності трафіку. Розглянемо функцію  $f$  як

$$f(x, \dot{x}, t) = \sum_{i=1}^N a_i \delta_i(t_i), \quad (2.49)$$

де  $N$  – кількість збурень на інтервалі  $[0, T]$ ,  $a_i$  – амплітуда збурення  $-A \leq a_i \leq A$ ,  $A$  – максимальна амплітуда збурення (згенерована випадковим чином),  $\delta_i$  – дельта-функція,  $t_i$  – момент часу, в якому виявляється  $i$ -е збурення, що генерується випадковим чином.

Для побудови розв'язку обрано наступне рівняння (2.48) спочатку без збурювальної функції

$$\ddot{x} + \alpha^2 x^n = 0 \quad (2.50)$$

Записуючи диференціальне рівняння другого порядку (2.50) як систему диференціальних рівнянь першого порядку, а також здійснивши заміну змінних  $y = \dot{x}$ , диференціальне рівняння другого порядку (2.48) можна подати як наступну систему диференціальних рівнянь першого порядку [47]:

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} - y = 0 \\ \frac{dy}{dt} + \alpha^2 x^n = 0 \end{cases} \quad (2.51)$$

а розв'язання (2.51) представляється через періодичні Атеб-функції як

$$\begin{cases} x = aCa(n, 1, \varphi) \\ y = a^{\frac{1+n}{2}} hSa(1, n, \varphi) \end{cases} \quad (2.52)$$

де  $h^2 = \frac{2a^2}{1+n}$ ,  $a$  – амплітуда коливань,  $Ca(n, 1, \varphi), Sa(1, n, \varphi)$  – Атеб-косинус і Атеб-синус відповідно. Змінна  $\varphi$  пов'язана з часом  $t$  співвідношенням вигляду

$$\varphi = \frac{a^{\frac{n-1}{2}}}{L} t + \varphi_0 \quad (2.53)$$

де  $L$  – деяка константа,  $\varphi_0$  – початкова фаза коливань, які визначаються з початкових умов для рівняння (2.50).

Періодичні умови представлені виразами:

$$\begin{cases} Ca(n, 1, \varphi + 2\Pi) = Ca(n, 1, \varphi) \\ Sa(1, n, \varphi + 2\Pi) = Sa(1, n, \varphi) \end{cases} \quad (2.54)$$

де  $\Pi$  є півперіодом Атеб-функції. Коли вирази (2.52) і (2.53) підставити в рівняння (2.51) та взяти до уваги умови (2.54), і отримаємо таке співвідношення для обчислення константи  $L$  у формулі (2.53):

$$L = \frac{2B(0.5, \frac{1}{1+n})}{\Pi(1+n)h} \quad (2.55)$$

У формулі (2.55) найменування  $B(x, y)$  означає повну Beta-функцію з аргументами  $x=0.5$ ,  $y=1/1+n$ . Беручи до уваги формулу (2.54) і вираз  $Ca(n, 1, \varphi)^{m+1} + Sa(1, n, \varphi)^2 = 1$  та отримуємо результуючу формулу для обчислення півперіоду Атеб-функції

$$\Pi(n, 1) = B(0.5, \frac{1}{1+n}) \quad (2.56)$$

Розглянемо первинні умови для системи диференціальних рівнянь (2.51). У праці [76] такі початкові умови для диференціального рівняння (2.48) розглядаються як

$$x(0) = 0, \dot{x}(0) = const \quad (2.57)$$

припускаючи, що  $n = \frac{1}{2k+1}$  і  $k \rightarrow \infty$ . Такі початкові умови не можуть бути використаними для імітаційного моделювання трафіку. Висунемо припущення, що значення трафіку та зміни таких значень трафіку є постійно визначеними в момент часу  $t = 0$ . Відповідно до цих припущень ми визначаємо початкові умови як

$$x(0) = c_1, \dot{x}(0) = c_2 \quad (2.58)$$



де  $c_1$  визначає початковий трафік та  $c_1 \neq 0$ ,  $c_2$  визначає зміну початкового трафіку та може дорівнювати нулю в початковий момент часу  $t = 0$ . Беручи до уваги, що  $Ca(n, 1, 0) = 1$  і  $Sa(1, n, 0) = 0$  та рівняння (2.52) отримуємо з початкових умов (2.58), що  $c_1 = a$  і  $c_2 = 0$ .

Здійснимо використання асимптотичного методу для створення розв'язку рівняння (2.48) на підставі (2.52). Асимптотичний метод створює вирішення у вигляді ряду з малим параметром  $\varepsilon$

$$x(t) = \sum_{i=1}^{\infty} \varepsilon^i x_i(t) \quad (2.59)$$

Для чисельного моделювання ми повинні відкинути члени, які містять  $\varepsilon$  на порядок більші ніж  $M$ . Отож, буде отримано рішення з точністю порядку  $\varepsilon^{M+1}$ . Наступним кроком знаходимо розв'язки у вигляді рядів за малим параметром  $\varepsilon$ , наступним чином

$$x(t) = \sum_{i=1}^M \varepsilon^i x_i(t) \quad (2.60)$$

Підставивши ряд (2.60) в ліву частину (2.48) і після цього вираз з таким самим порядком малого параметра  $\varepsilon$  були прирівняні одне до одного. Тепер розглянемо (2.48) яке перетворюється в систему диференціальних рівнянь зі змінними (Так само, як (2.50) в (2.51)) у вигляді

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} - y = 0 \\ \frac{dy}{dt} + \alpha^2 x^n = \varepsilon f(t, x, y) \end{cases} \quad (2.61)$$

Асимптотичне наближення представляється за допомогою малого параметра  $\varepsilon$ . Щоби створити перше наближення в (2.60) відповідно першому порядку  $\varepsilon$  ( $M = 1$  у формулі (2.60)) здійснюємо заміну змінних у вигляді

$$x = \xi + \varepsilon f(t, \xi, \zeta), y = \zeta = \dot{x} \quad (2.62)$$

та прирівнюємо коефіцієнти для однакових ступенів  $\varepsilon$ , а також не враховуємо члени вищого порядку по відношенню до  $\varepsilon$ . Як показано в [10] (2.1), змінні  $\xi, \zeta$  визначаються відносно розв'язків без збурення (2.52), та можуть розглядатись у вигляді покращеного першого наближення розв'язків (2.61) і (2.62).

## 2.6 Застосування методу Боголюбова-Митропольського, Ateb-функцій та їх властивостей для побудови математичної моделі трафіку

На основі проведеного аналізу було запропоновано новий метод моделювання мережного трафіку. Головне припущення полягає в тому, що природа мережевого трафіку має періодичний характер. У цьому випадку було здійснено моделювання добового циклу періодичності.

Першим кроком відбувалось моделювання основного тренду трафіку. Однак, як показано на рис. 2.1, 2.2 розрахунок кривої моделювання не враховує різких пульсацій трафіку.

Наступним кроком було запропоновано використовувати рівняння для моделювання та прогнозування поведінки трафіку в комп'ютерній мережі, які описують нелінійні коливні систем з одним ступенем вільності та з малими збуреннями. Передбачається, що основна періодична складова імітує добові коливання трафіку в мережі, в той час як відхилення трафіку від основного тренда моделюється за допомогою дельта-функції з малим параметром [10]. Асимптотичний метод було використано для побудови розв'язків диференціальних рівнянь з малим параметром.

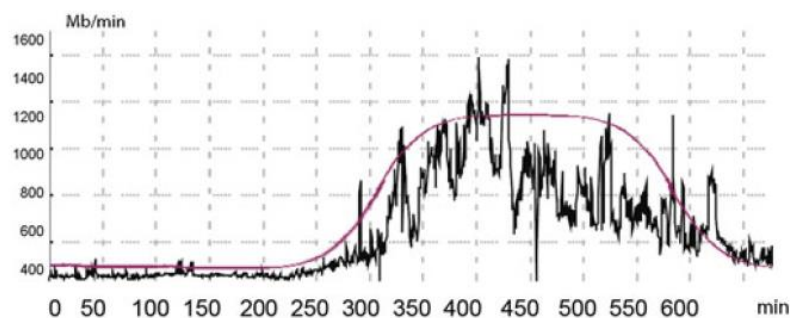


Рис. 2.1 Імітаційне моделювання трафіку з періодичними збуреннями (Приклад 1)

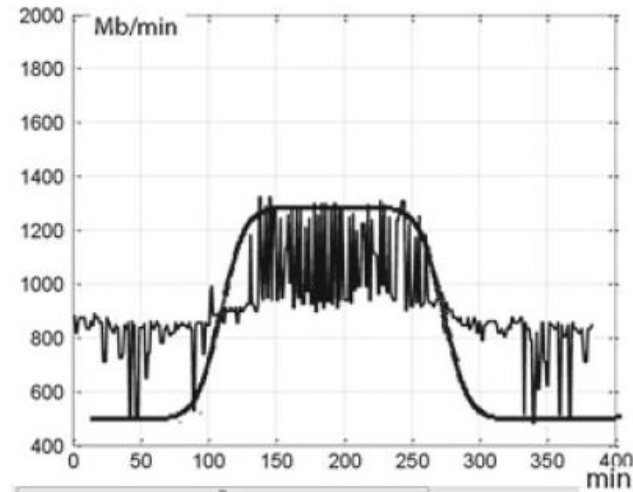


Рис. 2.2 Імітаційне моделювання трафіку з періодичними збуреннями (Приклад 2)

Наступним кроком було розглянуто функції  $f(\xi, \zeta, t), g(\xi, \zeta, t)$  у вигляді

$$f(\xi, \zeta, t) = \sum_{i=1}^{N_1} a_i \delta_i(t_i), \quad g(\xi, \zeta, t) = \sum_{i=1}^{N_2} b_i \delta_i(t_i), \quad (2.63)$$

де  $N_1, N_2$  – кількість збурень функцій  $f$  та  $g$  відповідно,  $a_i$ - амплітуда  $i$ -го збурення для функції  $f$  в момент часу  $t_i$ ,  $b_i$ - амплітуда  $i$ -го збурення для функції  $g$  в момент часу  $t_i$ .

В подальшому було отримано формули для моделювання трафіку в мережі на підставі поліпшеного наближення асимптотичного методу для диференціального рівняння коливальних рухів з малим збуренням у вигляді

$$\begin{cases} \xi = aCa(n, 1, \varphi) - \varepsilon f(\xi, \zeta, t) \\ \zeta = a^{\frac{1+n}{2}} hSa(1, n, \varphi) - \varepsilon g(\xi, \zeta, t) \end{cases} \quad (2.64)$$

Отже, отримано аналітичні вирази для моделювання трафіку у мережі.

### 2.6.1 Адекватність розробленої математичної моделі трафіку

Здійснимо моделювання добового коливання трафіку комп'ютерної мережі за допомогою описаних формул (2.64) [98, 99, 115]. З метою здійснення моделювання добових коливань трафіку було вибрано значення параметрів  $n$  та  $m$ , що дорівнюють 7 та 1 відповідно. Оскільки Атеб-функція з такими параметрами має великі проміжки значень, які є близькими до максимального та мінімального, а це якраз і

відповідає поведінці значень трафіку мережі. На рис.2.3 показано графік функції  $Sa(1,7,t)$ . З метою здійснення моделювання також було здійснено відповідне масштабування та промодельовано добові коливання трафіку в комп'ютерній мережі. При цьому період функції вважається рівним 24 годинам. У таблиці 2.1 показано дані, що були використані для моделювання (А – амплітуда збурення, П – період Ateb-функції, N – кількість збурень, n – параметр Ateb-функції):

### Дані моделювання трафіку

Таблиця 2.1.

Експеримент, №	T,сек	N	A	n	П
E1	86400	50000	500	7	9,22
E2	86400	50000	600	7	9,22
E3	86400	55000	500	7	9,22

Для апробації результатів експериментів моделювання було застосовано дані трафіку комп'ютерної мережі Інституту теоретичної та прикладної інформатики Польської Академії наук [108]. Порівняння результатів проведеного моделювання для експериментів E1, E2, E3 знаходяться у таблиці 2.2, та проводилось за критерієм максимальної кореляції  $\rho$ . Крім того, за результатами досліджень також було обчислено коефіцієнт  $k$  як відношення стандартної девіації до максимальної. Результати порівняння показані у таблиці 2.2. У цих експериментах початково проводилась зміна кількості збурень – експеримент E3 а також – максимальної амплітуди функції збурень у експерименті E2. Однак, найкращі результати було отримано для модельних даних експерименту E1.

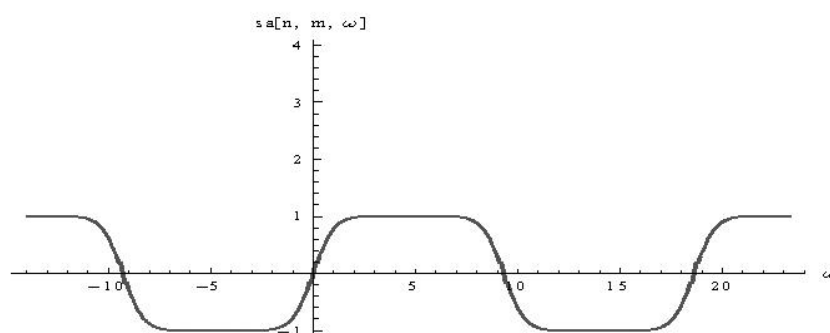
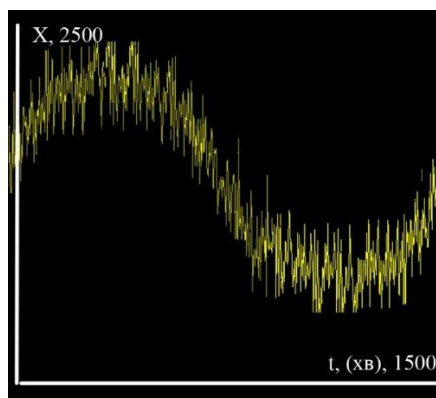


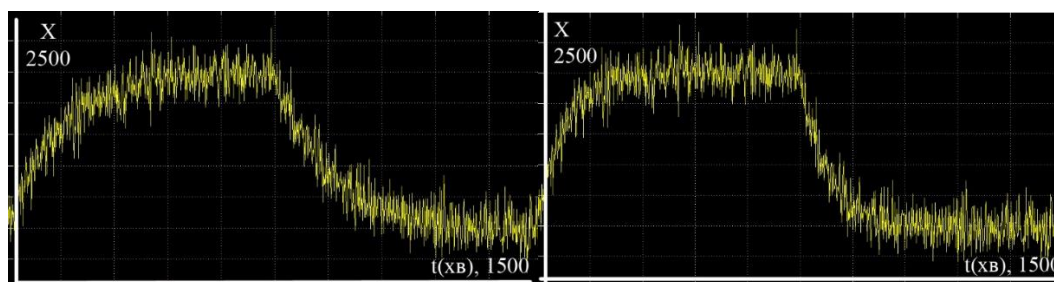
Рис. 2.3. Графік функції  $Sa(1,7,t)$

На рис.2.4 представлені результати моделювання трафіку мережі на підставі формул (2.66) для різних вихідних даних, що подані в таблиці 2.1.

Основною складністю при моделюванні трафіку є вибір правильного масштабування періоду Ateb-функції, відносно реального часу доби, а також масштабування амплітуди великих коливань, оскільки амплітуда коливань Ateb-функції дорівнює 1.



А)



Б)

B)

Рис. 2.4. Результати моделювання на підставі рівнянь (2.66)

А)- для модельного експерименту E1; Б)- для модельного експерименту E2;

В)- для модельного експерименту E3

### Порівняння результатів моделювання трафіку з реальними даними трафіку

Таблиця 2.2.

	E1	E2	E3
k	10,81%	12,56%	12,75%
$\rho$	0,79	0,75	0,74

В якості математичної моделі для цих експериментів були використані диференціальні рівняння коливальних рухів з малим збуренням. Розв'язки рівнянь

було створено на основі методу усереднення, а для побудови моделі трафіку даних було використано покращене перше наближення. Показано, що незбурений розв'язок представляється як Ateb-функція. Малі збурення змодельовано за допомогою функцій Дірака, які є випадковими у появі в часі та мають випадково вибрану амплітуду збурення. Для моделювання використано середовище MatLab, а саме пакет Simulink. Дослідження, описання та випробування отриманих результатів проводилась як порівняння експериментально отриманих даних з даними зразками реального трафіку за критерієм кореляції. Визначено, що відхилення отриманих даних становить приблизно 11-13%.

Отже, зважаючи на отримані результати, дана модель може бути використана для прогнозування або моделювання трафіку в комп'ютерних мережах, а також у телекомунікаційних мережах та мережах мобільного зв'язку.

## **Висновки до розділу 2**

1. Опрацьовано та досліджено застосування методу усереднення Боголюбова-Митропольського для різнотипних завдань, а також математичний апарат Ateb-функцій, та показано застосування цих функцій для вирішення задач у різних галузях людської діяльності.
2. Опрацьовано та досліджено теорію нелінійних диференціальних рівнянь коливного руху для моделювання періодичних процесів та поведінки цих систем. Здійснено опис динамічних процесів досліджуваних нелінійних систем, що описуються за допомогою Ateb-функцій.
3. На основі проведених досліджень було розроблено модель трафіку в комп'ютерних мережах на основі методу усереднення Боголюбова-Митропольського, що використовувався для опису моделювання диференціальних рівнянь, а відхилення тренду трафіку від основного потоку було змодельовано за допомогою функції Дірака із застосуванням малого параметра.

4. Змодельовано коливання трафіку за допомогою розробленої математичної моделі трафіку. Для здійснення експериментального тестування результатів модельних експериментів було використано зразки трафіку, отримані у комп'ютерній мережі ІТАРІ PAS за критерієм максимальної кореляції. Відхилення отриманих результатів становить приблизно 11-12%, що свідчить про необхідну адекватність розробленої математичної моделі трафіку.

## РОЗДІЛ 3

РОЗРОБЛЕННЯ МЕТОДУ КОРОТКОСТРОКОВОГО ПРОГНОЗУВАННЯ  
ІНТЕНСИВНОСТІ ТРАФІКУ ТА УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДУ  
МАРШРУТИЗАЦІЇ ТРАФІКУ У ВУЗЛОВОМУ ОБЛАДНАННІ

У третьому розділі дослідження реалізовано та розроблено алгоритмічний метод моделювання збурень на основі математичного апарату Атеb-функцій, а також реалізовано метод короткострокового прогнозування інтенсивності трафіку з довільними параметрами, удосконалено метод маршрутизації пакетів для покращення роботи мережного обладнання. Подано опис розробленого аналізатора трафіку для розробленої інформаційної технології.

### 3.1. Алгоритм моделювання збурень в нелінійних системах та його реалізація

Для програмної реалізації математичної моделі періодичних процесів у нелінійних системах за основу вибрано співвідношення (2.45) і (2.46). Для обчислень використано алгоритм пошуку значень Атеb-функцій косинуса і синуса  $Sa(n, m, l\varphi)$ ,  $Ca(m, n, l\varphi)$  який представлено у роботі [17]. На цій основі розроблено відповідне програмне забезпечення. До вхідних даних, які використовуються у обчисленнях, належать значення коефіцієнтів  $m, n, \alpha_1, \alpha_2$  і значення амплітуди  $a$ . Результатом обчислення є фазові координати руху точок  $x$  та  $y$  і параметр  $\omega(a)$ . Результатом роботи програмного забезпечення є табличне подання (рис. 3.1) та графічне зображення вихідних даних (рис. 3.2, 3.3).

Опишемо реалізований алгоритмічний метод [97]. На початковому етапі було вказано параметри  $m, n, \alpha_1, \alpha_2$  і  $a$ , при цьому перевіряємо умову періодичності (2.5). Далі здійснюємо табулювання Атеb-функції залежно від значень заданих параметрів  $n, m$ . Розроблене ПЗ обчислює значення фазових координат  $x$  та  $y$  за формулами (2.45) і (2.46), і заповнює таблицю результатів. Початково графік будується лише на чверть періоду, але знаючи що обрана функція є періодичною, із значенням періоду



2П ( $m, n$ ), продовжуємо графік на весь період. Також було застосовано результати обчислення для побудови трьохвимірних графіків залежності значень фазових координат від параметрів  $\alpha_1, \alpha_2$  (рис. 3.4).

N <sup>o</sup>	a	Cos	Sin	X	Y	Омега
1	0	1	0	1	0	0,54981409782
2	0,1	0,84765625	0,182273942	0,84765625	0,167502123	0,54981409782
3	0,2	0,67578125	0,361836980	0,67578125	0,332513040	0,54981409782
4	0,3	0,48828125	0,547223680	0,48828125	0,502875656	0,54981409782
5	0,4	0,30078125	0,725708336	0,30078125	0,666895586	0,54981409782
6	0,5	0,10546875	0,905795063	0,10546875	0,832387751	0,54981409782
7	0,555167030	0	1	0	0,918958144	0,54981409782

Рис. 3.1 Обчисленні значення фазових координат  $x$  та  $y$  і параметра  $\omega(\alpha)$  для значень  $n = 0,01$   $m = 0,1$ .

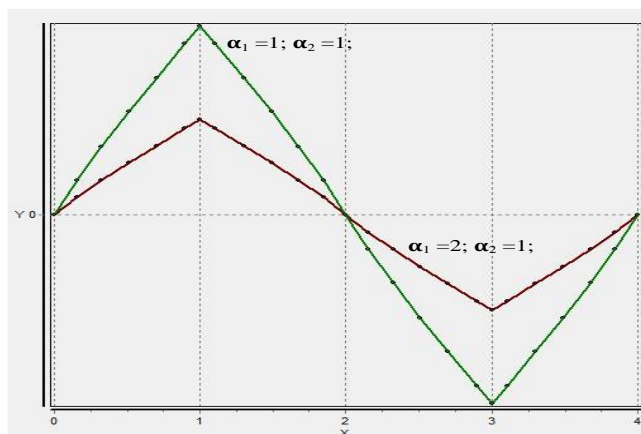


Рис. 3.2 Графік руху точки  $(x, y)$  для значень  $n = 0,01$   $m = 0,1$  і  $\alpha_1 = 1, \alpha_2 = 1, \alpha_1 = 2, \alpha_2 = 1$ .

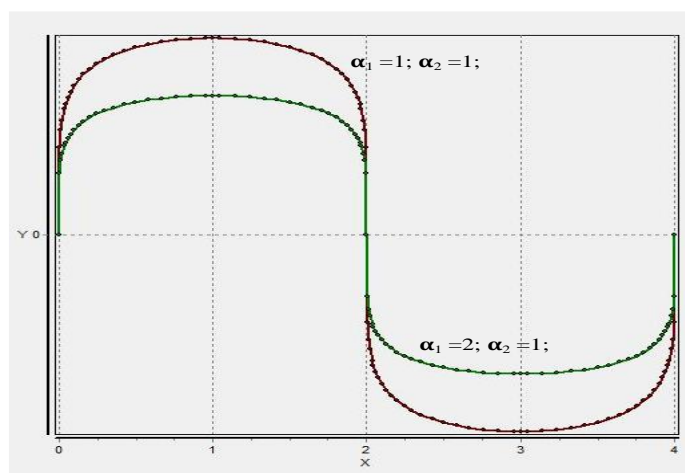


Рис. 3.3 Графік руху точки  $(x, y)$  для значень  $n = 1$   $m = 5$  і  $\alpha_1 = 1, \alpha_2 = 1, \alpha_1 = 2, \alpha_2 = 1$ .

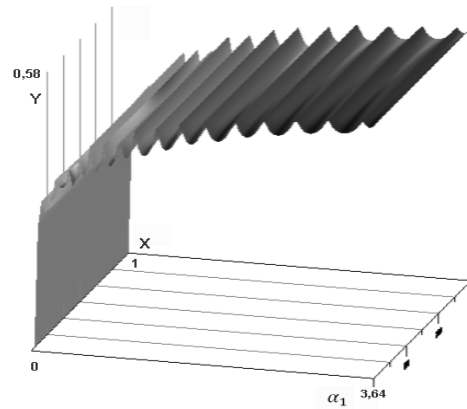
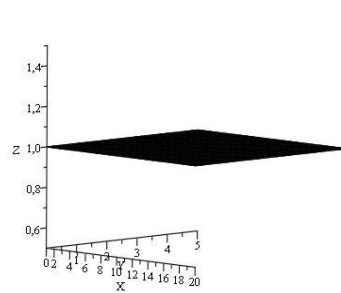
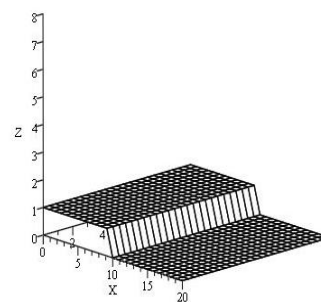


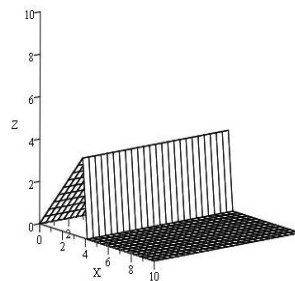
Рис. 3.4 Графік зміни руху в залежності від зміни параметра  $\alpha_1$ .



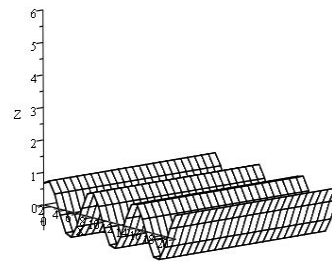
(а)



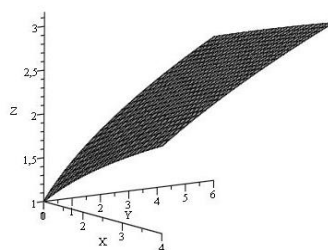
(б)



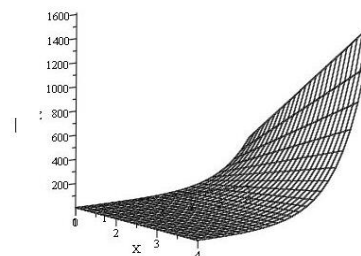
(в)



(г)



(д)



(е)

Рис. 3.5. Графічне зображення збурень.

Здійснивши моделювання поведінки системи при використанні незбурених коливань, наступним кроком є моделювання процесів у нелінійних коливних

системах з малим збуренням. Наступним кроком здійснимо розгляд наступних видів збурення, представлених на рисунках 3.5 а, - е. Формули, за якими проведено збурення представлені в (3.1) – (3.6).

$$f(x, y) = A_\varepsilon; g(x, y) = B_\varepsilon$$

(3.1)

$$f(x, y) = \begin{cases} A_\varepsilon, x < const \\ 0, x \geq const \end{cases}, g(x, y) = \begin{cases} B_\varepsilon, y < const \\ 0, y \geq const \end{cases}$$

(3.2)

$$f(x, y) = \begin{cases} x, x < const \\ 0, x \geq const \end{cases}, g(x, y) = \begin{cases} y, y < const \\ 0, y \geq const \end{cases}$$

(3.3)

$$f(x, y) = A_\varepsilon \sin(x); g(x, y) = B_\varepsilon \sin(y);$$

(3.4)

$$f(x, y) = (x + y)^{A_\varepsilon}; g(x, y) = (x + y)^{B_\varepsilon}$$

(3.5)

$$f(x, y) = x \cdot \exp(y); g(x, y) = y \cdot \exp(x)$$

(3.6)

У формулі (3.1) показано постійне збурення, у (3.2) представлено стрибкоподібне збурення, у (3.3) лінійне на певному проміжку, у (3.4) – періодичне збурення, у (3.5) – степеневе збурення, у (3.6) – експоненціальне збурення. Ці збурення вводяться у систему (2.31) та здійснюється моделювання поведінки системи.

В подальшому було змодельовано щоденні коливання циклу трафіку в комп'ютерних мережах телекомунікаційних компаній. При виборі параметрів  $m, n$  великі пульсації трафіку моделювалися для даних 2-х різних трафіків потоків, зображених на Рис. 3.6, проте локальні коливання були змодельовані з використанням малих збурень. На рис. 3.4 показано моделювання цього трафіку за допомогою періодичного збурення (3.4). Порівняння результатів моделювання представлені в таблиці 3.1.

## Розрахунок кореляції $\rho$ та коефіцієнту $K$ стандартної девіації відносно максимальної девіації

Таблиця 3.1

$m=1/3, n=1/7$	M1	M2	M3( $m=1, n=7$ )
$k$	40%	16%	12%
$\rho$	0.52	0.78	0.82

У даних випадках моделювання були взяті до уваги модель без збурення (M1), модель з періодичним збуренням (3.4) (M2) і модель з періодичним збуренням як Атеб-функції, яка може має інші параметри  $m, n$  (M3). Кореляція  $\rho$  та коефіцієнт стандартної девіації щодо максимальної девіації були обчислені на половині інтервалу періоду Атеб-функції.

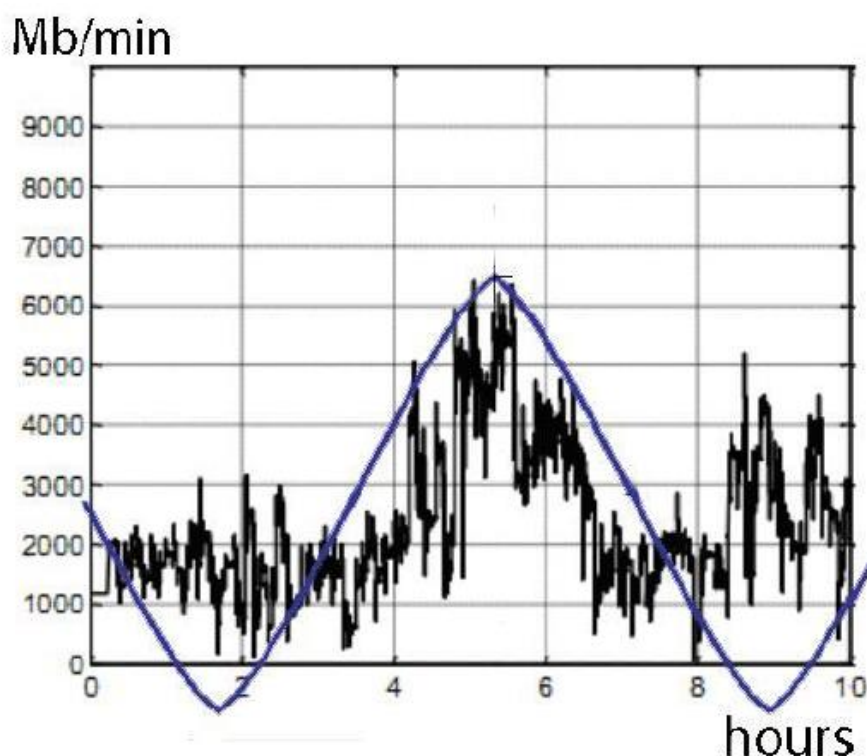


Рис. 3.6. Графічне зображення змодельованих збурень.

Рис.3.6 та 3.7 - різні приклади моделювання трафіку в телекомунікаційних системах і результати розрахунку моделі з періодичним збуренням.

Отже, було розроблено математичну модель пульсацій та збурень трафіку, а побудовані методи розрахунків і відповідне програмне забезпечення є потужним

інструментом для вивчення коливних процесів у нелінійних системах моделювання процесів трафіку комп'ютерної мережі у телекомунікаційних системах.

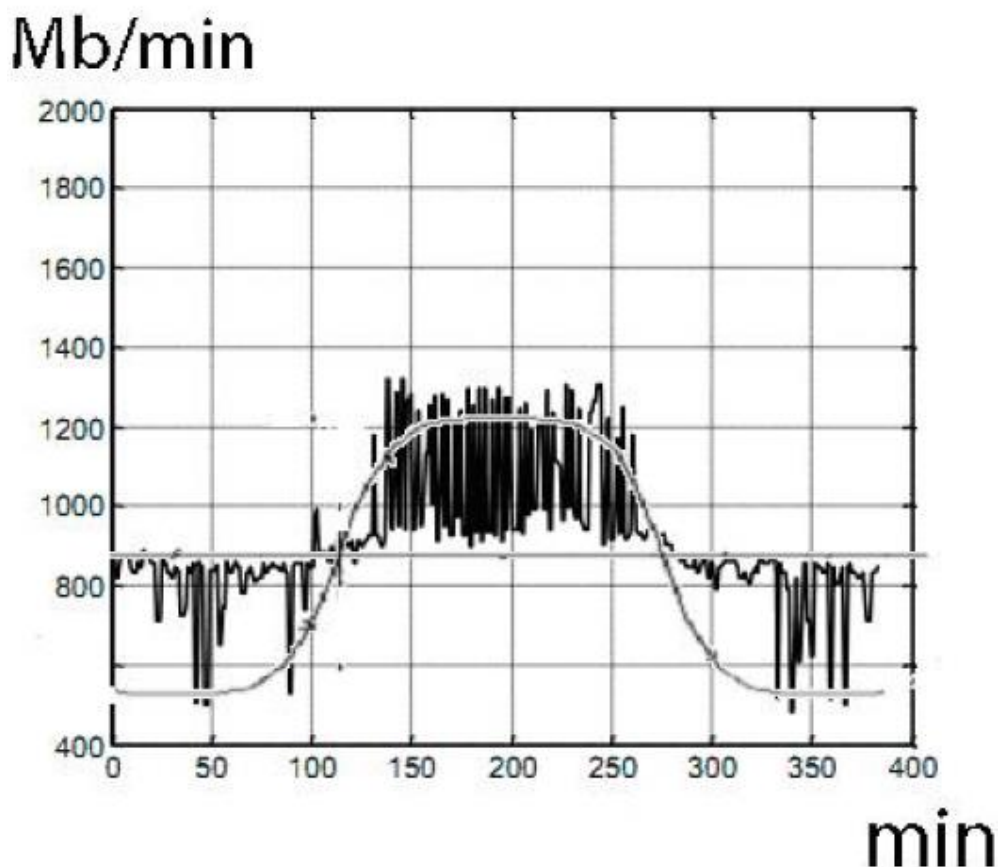


Рис. 3.7. Графічне зображення змодельованих збурень.

У підсумку проведення досліджень нелінійних динамічних систем, було встановлено, що існує можливість розробити нову математичну модель трафіку в комп'ютерній мережі, за допомогою математичного апарату Ateb – функцій. Ateb – функції дають змогу сформулювати розв'язки нелінійних диференціальних рівнянь із степеневою нелінійністю.

Проведене дослідження розв'язних рівнянь у вигляді Ateb-функцій та можливості їхньої застосовності для створення математичної моделі трафіку комп'ютерної мережі засвідчило, що найбільша користь при використанні даної моделі (у середньому до 12%) отримується у випадку короткострокового прогнозування та дослідження максимально нелінійних інтервалів трафіку в порівнянні з існуючими зразками, при цьому необхідним є збереження відповідності

(у межах норми) з реальними зразками трафіку та іншими відомими моделями трафіку в комп'ютерних мережах.

## **3.2 Характеристика інструментальних засобів та їх використання для дослідження трафіку**

### **3.2.1 Характеристика аналізаторів мережевих протоколів**

Для дослідження мережевого трафіку фахівцями в галузі дослідження та роботи з комп'ютерними мережами на сьогоднішній день застосовується велика кількість як математичного, так і програмного інструментарію. Серед одного з найефективніших типів такого інструментарію можна виділити програмне забезпечення, створене з метою дослідження потоків трафіку між вузлами комп'ютерної мережі, програмне забезпечення для дослідження продуктивності роботи таких мереж та його обладнання, а також програми для аналізу та характеристики мережевих протоколів та різнотипних технологій передавання даних в комп'ютерних мережах [37].

Серед всього різноманіття описаного програмного забезпечення слід виділити сніфери, оскільки захоплення зразків трафіку ними може відбуватись багатьма методами, що дає змогу досліджувати власне трафік у вигляді потоку не залежно від того, з якого типу мережі та якого типу обладнання він був отриманий.

Захоплення зразків мережевого трафіку може здійснюватися такими переліченими методами [130]:

- звичайним «прослуховуванням» мережевих інтерфейсів (метод ефективний при використанні в сегменті мережі концентраторів («hubs») замість комутаторів («switches»), в інших випадках такий метод є малоефективним, оскільки на програму-сніфер потрапляють лише деякі фрейми);
- підключенням сніфера до розриву каналу в комп'ютерній мережі;
- відгалуженням (програмним чи апаратним) трафіку та направленням його копій на сніфер;

- за допомогою аналізу побічного електромагнітного випромінювання та пізнішим відновленням такого трафіку, котрий власне й «прослуховується»;
- здійсненням атаки на мережевому чи каналному рівнях, яке призводить до перенаправлення трафіку «жертви» або трафіку цілого сегменту на сніфер з наступним поверненням його на початкову адресу.

На початку 1990-х років такі сніфери отримали широке використання власне хакерами для захоплення користувацьких логінів та паролів (та інших цінних даних), які в деяких мережевих протоколах передавались у незашифрованому або зашифрованому слабкими алгоритмами вигляді. Значне поширення концентраторів (hubs) дозволяло легко захоплювати зразки трафіку у великих сегментах мережі майже без ризику бути виявленим.

Сніфери знайшли свої можливості застосування як і в хороших, так і в поганих цілях. Аналіз трафіку, який пройшов через сніфер, дає змогу:

- виявити та схопити паразитний чи вірусний та зациклений трафік, наявність якого в мережі збільшує завантаження мережного обладнання та каналів зв'язку (таке ПЗ тут є малоефективними; як правило, для таких цілей використовують зібрану різноманітну статистику з допомогою серверних комп'ютерів та активних мережевих пристроїв та подальше її аналізування);
- відшукати в мережі шкідливе та несанкціоноване ПЗ, наприклад, різноманітні мережеві сканери, троянські програми, флудери, клієнтів пірінгових мереж та інше (це зазвичай здійснюється з допомогою спеціалізованого програмного забезпечення, так званих сніферів — моніторів мережевої активності);
- схопити довільний незашифрований (а подеколи і зашифрований) трафік користувачів з метою одержання паролів та будь-якої секретної інформації;
- локалізувати несправність комп'ютерної мережі чи некоректні налаштування мережевих агентів (з цією метою це програмне забезпечення часто використовується системними адміністраторами).

Враховуючи те, що в так званому «класичному» сніфері аналіз зразків трафіку здійснюється вручну, із застосуванням виключно найпростіших засобів

автоматизації (аналізування протоколів, відновлення TCP-потоків), то він дає змогу досліджувати тільки невеликі його об'єми.

На сьогодні існує безліч різних сніферів, тому їх поділяють на наступні категорії:

- Пакетні сніфери (Etherscan Analyzer, Network Probe).
- Принт-сніфери (O & K Print Watch, Print Inspector), які дозволяють контролювати і керувати друком в мережі;
- Аналізатори протоколів (Wireshark, TracePlus32 Web Detective, CommView);
- HTTP сніфери (HTTP Analyzer, IEWatch Professional, EffeTech Sniffer), які захоплюють HTTP заголовки;
- Сніфери бездротових мереж (Kismet, airodumpng, CommView for WiFi), які захоплюють трафік безпроводних мереж без підключення до цих мереж;
- Сніфери IM систем (MSN, ICQ Sniffer, AIM Sniff, IM- Sniffer), які надають перехоплену переписку у вигляді, зручному для читання;
- Парольні сніфери (Cain&Abel, Ace Sniffer), які захоплюють та контролюють різноманітні паролі;

Etherscan Analyzer — це один з найбільш багатофункціональних аналізатор мережевого трафіку для систем, що працюють на основі операційної системи Microsoft Windows. За допомогою цього ПЗ системний адміністратор може перехоплювати та досліджувати довільні пакети з даними, які переміщуються його мережею. Це програмне забезпечення забезпечує підтримку мережевих протоколів типів Ethernet, TCP/IP, NetBEUI та інших.

Також це ПЗ дозволяє здійснювати фільтрацію трафіку з метою відображення та відслідковування певних типів даних, відображає детальну інформацію про отриманий пакет, дає змогу відправляти у мережу певні вибірккові пакети з даними, а також має потужну систему фільтрації необхідної інформації.

Wireshark — це найвідоміший аналізатор мережевих протоколів у світі. Він дозволяє користувачеві спостерігати за тим, що відбувається у його мережі на «мікроскопічному» рівні. Це де-факто (і часто де-юре) є стандартом для багатьох галузей промисловості та освітніх установ. Розроблений компанією The Wireshark



Team, стабільно оновлюється з 21 червня 2012 року, написаний за допомогою мови програмування C++. Це програмне забезпечення розповсюджується згідно з умовами ліцензії GNU GPL. Для створення графічного інтерфейсу середовища Wireshark використано кросплатформову бібліотеку GTK+.

Восени 2013 року розробники Wireshark, інтерфейс котрого спочатку для своєї реалізації брав за основу бібліотеку GTK+ та був модифікований для використання нової версії цієї бібліотеки GTK+3, повідомили про переведення проекту на використання бібліотеки Qt. Причиною цього стало погіршення ситуації з ефективним підтриманням GTK+ абсолютно всіх платформ, для яких було створено Wireshark. Також на сьогодні впевнено стає реальністю велике бажання підготувати версії Wireshark не лише для платформ Apple iOS та Android а й для Windows 10, підтримка яких з'явилася у бібліотеках Qt.

Wireshark (раніше носив назву Ethereal) фактично є сніфером. Термін «сніфер» походить від англійського «to sniff» — нюхати — та є програмою або/чи програмно - апаратним пристроєм, який призначений для перехоплення та подальшого аналізування, або тільки для аналізування мережевого трафіку, який був призначений для отримання іншими вузлами комп'ютерної мережі.

Оскільки середовище Wireshark розпізнає структуру різноманітних мережевих протоколів, то воно дає змогу розібрати мережевий пакет з даними, відображаючи значення кожного з полів протоколу довільного рівня. Для захоплення пакетів у комп'ютерній мережі використовується спеціальний формат \*.pcap, надається також можливість захоплення інформації лише з тих мереж, котрі безпосередньо підтримуються даною бібліотекою. Крім того, Wireshark дозволяє працювати з достатньо великою кількістю форматів початкових даних, а отже, можна відкривати файли з даними, котрі були захоплені за допомогою інших програм, що розширює самі можливості захоплення таких мережевих даних.

Розвиток Wireshark процвітає завдяки вкладам експертів в розвиток комп'ютерних мереж у всьому світі. Він є продовженням проекту, розпочатого в 1998 році. У червні 2006 року проект перейменували на Wireshark через проблеми з торговою маркою.

Wireshark має багатий набір функцій та особливостей, який включає наступне [131]:

- Багаторівнева перевірка сотні протоколів, з більшою кількістю тих, котрі весь час додаються.
- Онлайн захоплення та офлайн аналіз.
- Трьохпанельний пакет браузера.
- Мульти-платформа: Працює на Windows, Linux, OS X, Solaris, FreeBSD, NetBSD, та на багатьох інших.
- Перехоплені мережеві дані можуть бути переглянуті за допомогою графічного інтерфейсу або через ТТУ - режим TShark утиліти.
- Найпотужніший дисплей фільтрів.
- Потужний аналіз VoIP.
- Зчитування та/і запис різноманітних форматів файлів захоплення: WAN / LAN Analyzer, Tektronix K12xx, Novell LANalyzer, Sniffer Pro та NetXray, TCPdump (Libpcap), Network Instruments Observer, Microsoft Network Monitor, Pcap NG, Network General Sniffer (стислий та нестислий), NetScreen Snoop, RADCOM Visual Networks Visual UpTime, WildPackets EtherPeek / AiroPeek / Shomiti / TokenPeek / Finisar Surveyor, Catapult DCT2000, Cisco Secure IDS IPLog, та багато інших.
- Схоплення файлів, які були стиснуті за допомогою Gzip, та можуть бути розпаковані миттєво.
- Оперативні дані можуть бути зчитані з Ethernet, IEEE 802.11, PPP/HDLC, ATM, Bluetooth, USB, Frame Relay, FDDI та ін. (в залежності від платформи).
- Правила позначення можуть бути застосовані в списку пакетів для швидкого та інтуїтивного аналізу.
- Вихідна інформація може бути виведена в файли типів XML, PostScript, CSV або як звичайний текст.
- Підтримка дешифрації для багатьох протоколів, серед яких IPsec, ISAKMP, SNMPv3, SSL / TLS, WEP, WPA/WPA2.

- Wireshark за своєю природою не є системою для виявлення несанкціонованих вторгнень. Він не попередить користувача про те, якщо хтось буде здійснювати несанкціоновані події в комп'ютерній мережі. Однак якщо таке відбуватиметься, Wireshark дасть змогу зрозуміти, що ж насправді стається.
- Wireshark не має змоги генерації мережевого трафіку, він може тільки захоплювати та аналізувати наявний. Загалом, діяльність Wireshark ніяк не проявляється комп'ютерній мережі, окрім як лише при резолвінгу доменних імен, але й ця функція може бути відключена.

В свою чергу, IE HTTP Analyzer — програмне забезпечення, яке дає змогу своїм користувачам перехоплювати HTTP пакети зі всіх браузерів, зокрема з Firefox. Це ПЗ дає змогу в зручній формі переглядати потокові запити, значення заголовків пакетів, та інші ключові інформаційні заголовки пакетів з даними. IE HTTP Analyzer дає змогу дослідити та покращити продуктивність роботи веб-сторінок за допомогою вимірювання їхньої час завантаження та розмір, а також розміщених на них картинок та скриптів, а також виявити вузькі місця у забезпеченні підвищення продуктивності роботи того ПЗ, що знаходиться в розробці.

Крім того, цей аналізатор дає змогу системним адміністраторам досліджувати, яка інформація передається та отримується різним ПЗ, додатками з метою контролю над передаванням підозрілих даних та забезпечення безпеки мережі.

Беручи до уваги переваги та недоліки інсуючого програмного забезпечення для дослідження мережного трафіку, аналізатор мережних протоколів Wireshark було обране як задовільне ПЗ для верифікації отриманих зразків трафіку, оскільки пакет його функціоналу дозволяє забезпечити всі необхідні умови для коректного дослідження трафіку різних типів та зібраного за допомогою різних методів, а також зібраного на різних машинах, з різними операційними системами, встановленими на них, у різних сегментах мережі а також при передаванні трафіку даних комп'ютерних мереж за допомогою різних первинних технології, та враховуючи можливу генерацію такого трафіку різними джерелами як паралельно, так і послідовно.

### **3.3 Загальна характеристика інформаційної технології аналізу та прогнозування трафіку комп'ютерних мереж**

#### **3.3.1 Загальна структура інформаційної технології аналізу та прогнозування трафіку комп'ютерних мереж**

Основною вимогою до передавання даних у комп'ютерних мережах зі сторони якості обслуговування (QoS) є виконання такою мережею її базових функцій, серед яких першою та найважливішою є можливість забезпечення користувачам цієї мережі можливостей доступу до всіх ресурсів, розміщених всередині мережі. Всі інші вимоги, а серед них, зокрема, такі як: захищеність, продуктивність, розширюваність та масштабованість, надійність, сумісність, керованість є напрямую пов'язаними з якістю виконання найпершої вимоги [14].

Мережне обладнання комп'ютерних мереж є надзвичайно високовартісним. З огляду на це, постає необхідність здійснювати ефективне використання ресурсів такого обладнання. Підвищення коефіцієнта завантаження мережного обладнання, що визначається відношенням швидкості передавання пакетів вузловим обладнанням до пропускної здатності цього вузлового обладнання, могло б суттєво підвищити ефективність використання такого обладнання. Проблемою на цьому етапі є те, що трафік у мережі володіє самоподібними властивостями та має пульсуючий характер, що знижує продуктивну завантаженість вузлового обладнання. Робота комп'ютерної мережі може бути ефективною, якщо будь-який її ресурс є значно завантаженим (орієнтовно 55-80%), але не перенавантаженим (приблизно 90-100%) в певний момент часу.

У літературі [2] запропоновано декілька різних способів підвищення завантаження вузлового обладнання за допомогою адаптивного перерозподілу пропускної спроможності такого обладнання в реальному часі [45]. Один із способів балансування навантаження, запропонований в цій праці, - це додавання апаратного розподільовача навантаження в комп'ютерну мережу між мережним обладнанням та мережними серверами [64]. Розподільовач навантаження містить у собі всю необхідну інформацію про інтенсивність передавання трафіку в комп'ютерній мережі.

Зокрема, необхідною інформацією може бути як обсяг трафіку до сервера або від нього чи швидкість, з якою сервер надсилає відповіді на TCP/IP запити, кількість з'єднань, яку підтримує в даний момент часу обраний сервер, історія запитів та відповідей на минулі запити. У балансувальник навантаження закладено певну кількість стандартизованих алгоритмів, якими може скористатись адміністратор для підвищення якості роботи комп'ютерної мережі. Альтернативний підхід запропоновано у роботі [45] – реалізація адаптивної системи управління перерозподілом пропускної спроможності мережного обладнання між визначеними портами, що бере до уваги інформацію про трафік в реальному часі.

Беручи до уваги факт великої різноманітності мережного обладнання та різноманітних апаратних рішень, доцільним є розроблення саме інформаційної технології, яка зробить ефективнішим процес прийняття рішень адаптивного управління.

На рисунку 3.8. зображено схему роботи методів розробленої інформаційної технології.

Враховуючи вищезазначене, було запропоновано на основі моніторингу трафіку в комп'ютерній мережі в реальному часі та розробленої математичної моделі прогнозування трафіку комп'ютерної мережі (див. розділ 2) приймати рішення про розподіл навантаження вузлового обладнання за допомогою адаптивного управління таким обладнанням.

Здійснений попередній аналіз зразків трафіку мережі використовується для побудови прогнозу тренду трафіку на наступні 3 - 5 хв. (в середньому), що використовується для оптимізації завантаження вузлового обладнання.

Розроблене ПЗ не вимагає встановлення [20]. Програма поставляється у вигляді архівного файлу, який необхідно розпакувати, а потім розпакований вміст можна розмістити в зручному для користувача місці на комп'ютері чи іншому обладнанні.

Найважливішими можливостями розробленого аналізатора трафіку є: зчитування зразків мережевого трафіку з комп'ютерної мережі із можливістю запису результатів зчитування в файл спеціального формату \*.pcap, аналіз попередньо записаних зразків мережевого трафіку. Оброблені дані про трафік зберігаються в

реляційній базі даних з роздільною здатністю 1 секунда. Також ПЗ надає можливість розрахунку переліку оптимальних мережевих маршрутів передавання даних на основі графової моделі за удосконаленого методу маршрутизації трафіку.

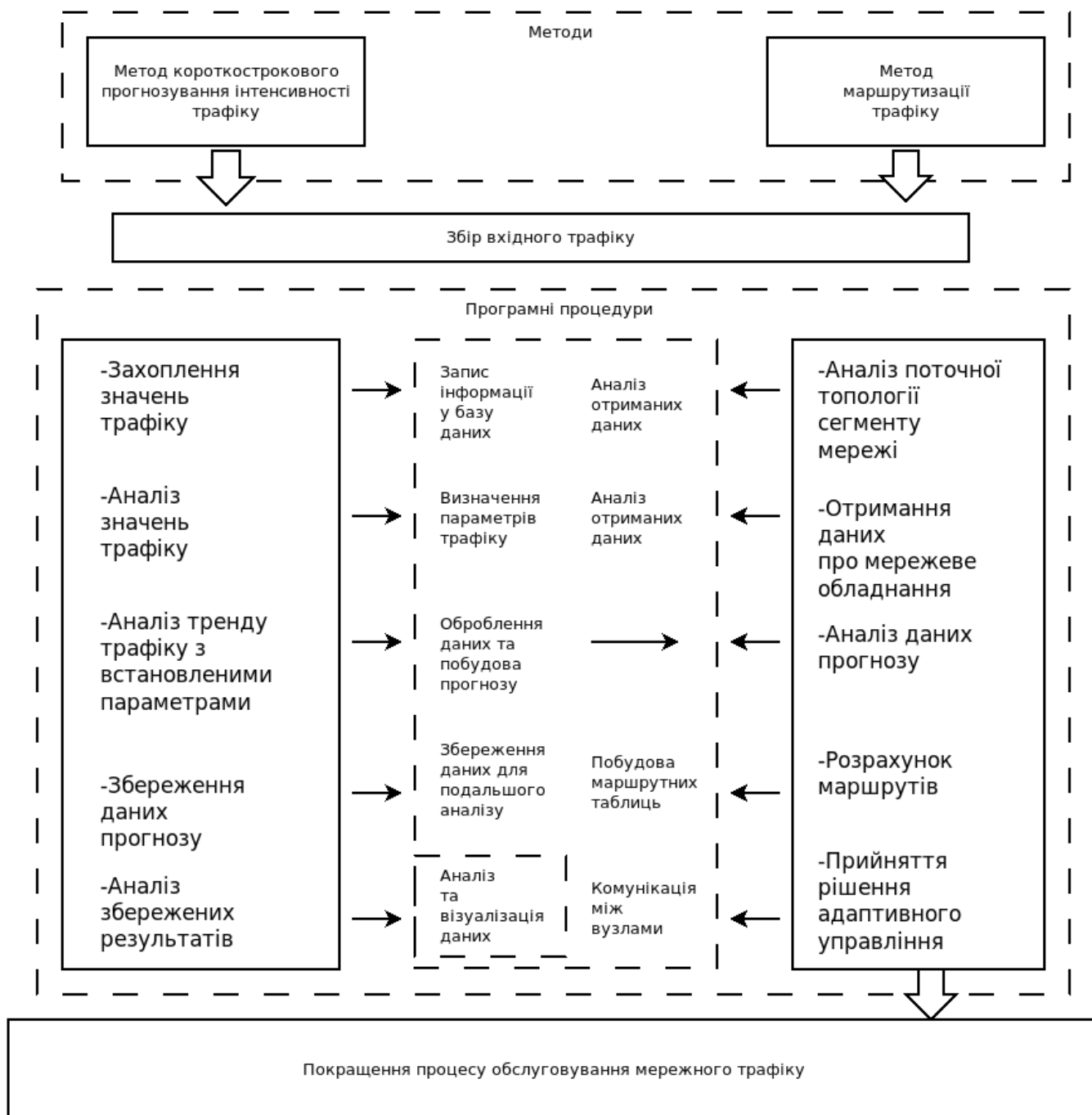


Рис. 3.8. Схема застосування інформаційної технології аналізу та прогнозування трафіку в комп'ютерних мережах.

Головним призначенням аналізатора трафіку комп'ютерної мережі є аналіз зразків цього трафіку з подальшою можливістю прогнозування величини трафіку за допомогою Ateb-функцій.

На рис. 3.9. зображено діаграму класів розробленої програми.

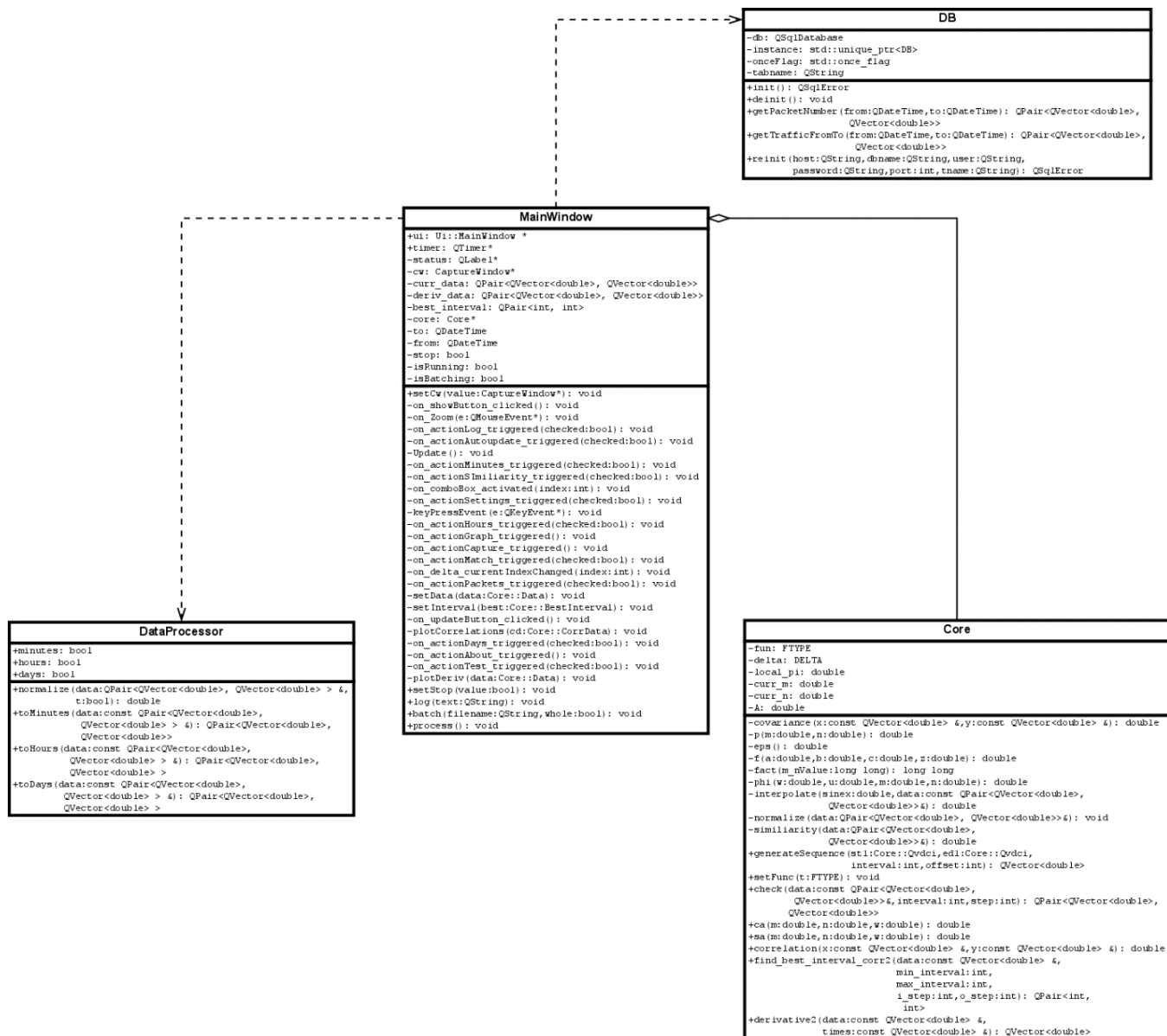


Рис. 3.9. Діаграма класів розробленого програмного забезпечення

Вікно захоплення трафіку дозволяє захоплювати трафік з мережевих інтерфейсів машини (рис. 3.10).

- Спадне меню Interface дозволяє вибрати мережевий інтерфейс або файл в спеціальному форматі \*.рсар для захоплення пакетів.
- Лічильник Time призначений для вводу часу захоплення (Значення -1 робить процес захоплення пакетів як завгодно довгим).
- Лічильник Number відповідає за кількість пакетів для захоплення (Значення -1 робить процес захоплення пакетів як завгодно довгим).
- Поле Dump, якщо воно не є пустим, містить назву файлу в форматі \*.рсар, в

який будуть записані захоплені пакети.

- Поле Filter дозволяє задати рядок фільтр для протоколу.
- Кнопка Start дозволяє розпочинати та зупиняти процес захоплення зразків.
- У текстовому полі внизу вікна виводяться результати захоплення зразків трафіку.

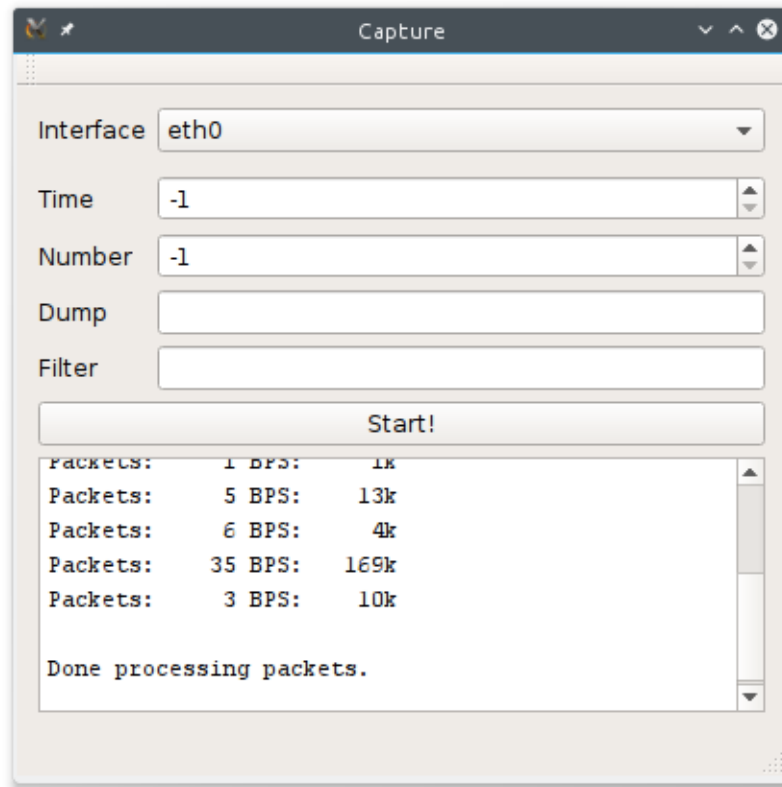


Рис. 3.10. Вікно програми для захоплення трафіку з обраного мережевого інтерфейсу

На рисунку 3.11 візуалізовано проведені спостереження у вікні розробленого ужитку за параметром сумарного трафіку на сервері. Крім того, аналізатор трафіку є призначений для забезпечення автоматизованого збору інформації з мережевих пристроїв та забезпечення процесу контролю роботи каналів зв'язку. Він передбачає автоматизацію процесу збору та аналізу характеристик мережі та їх відображення у зручному форматі для користувача.

Використання системи моніторингу трафіку комп'ютерної мережі дає змогу:

а) автоматично і цілодобово збирати дані (джиттер, затримка, швидкість) з пристроїв мережі;

б) в режимі реального часу слідкувати за роботою мережі.



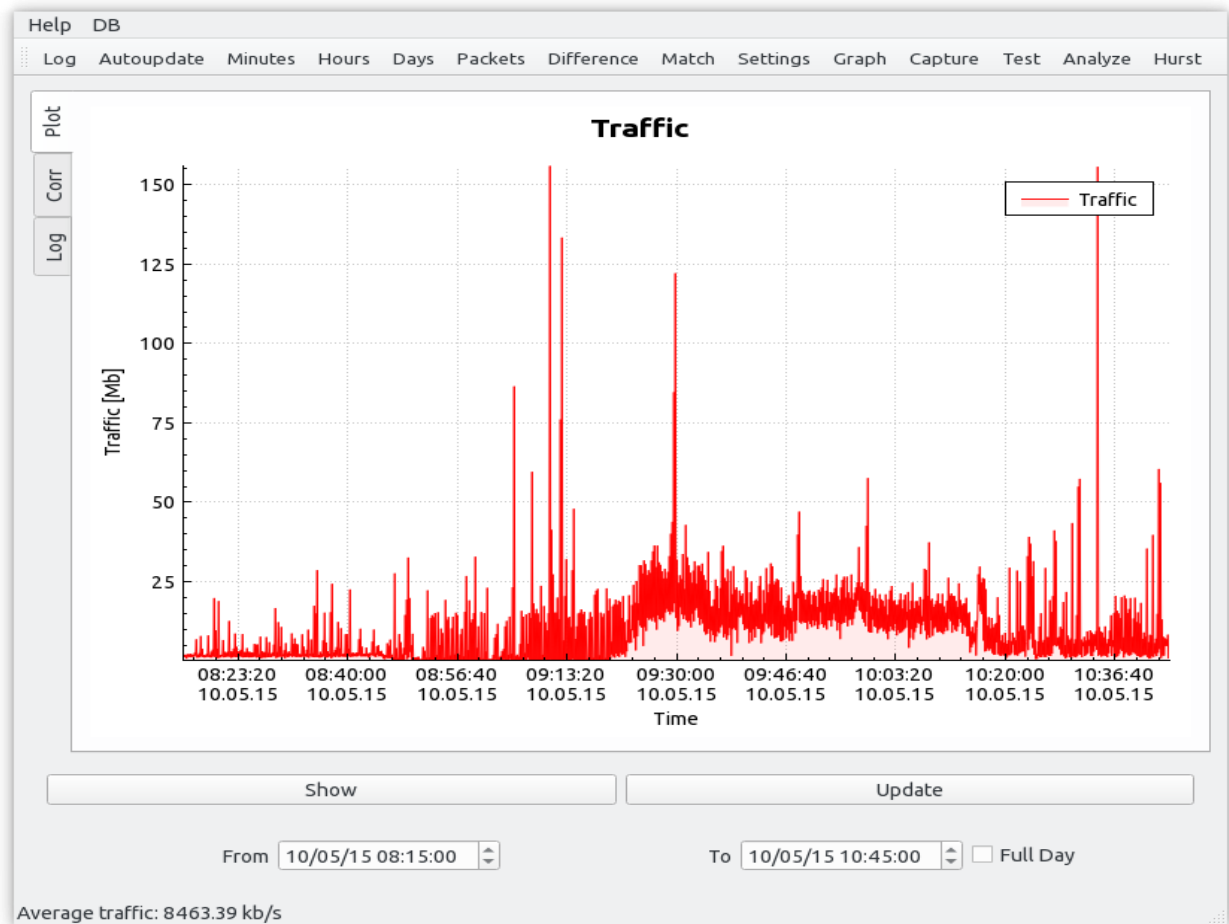


Рис.3.11 Візуалізація навантаження на мережевий порт кінцевого обладнання (веб-сервер у внутрішній мережі).

Мережевий аналізатор трафіку складається з серверної (PHP, HTML, CSS, JS) та клієнтської (C++/QT) частин [38, 71, 107]. Серверна частина займається аналізом та збереженням даних. В свою чергу клієнтська — збором, обробкою даних мережі та відображенням результатів. Цей програмний продукт створено автором за допомогою мов програмування C++ та Haskell і розповсюджується за ліцензією GNU GPL (Частина програмного коду показано у Додатку 2).

На рисунках 3.11 – 3.14 зображено головне вікно аналізатора, детально показано всі елементи панелі налаштувань, а також діалог підключення до бази даних.

Головне вікно програми відображається після підключення до бази даних. Головне вікно складається з області графіків та логування, панелі налаштувань та панелі управління (Рис. 3.12). У головному вікні відображаються основні операції з

аналізу трафіку. ПЗ для своєї роботи також використовує сервер баз даних PostgreSQL.

Область графіків трафіку – в цій області виводяться графіки трафіку, кількості пакетів, різниці між значеннями реального трафіку та прогнозованими на основі Ateb-функцій, кореляції між значеннями реального трафіку та прогнозованими на основі Ateb-функцій. Вісь абсцис показує значення часу, а вісь ординат відповідно значення, які залежать від часу.

Області відображення трафіку та кореляції дозволяють перетягувати та змінювати масштаб графіків, що на них зображені, за допомогою лівої клавіші та коліщатка миші.

В свою чергу, область логування призначена для виводу інформації про результати обчислень кореляції.

Область графіку трафіку – в цій області виводяться графіки трафіку, кількості пакетів, різниці між значеннями трафіку та Ateb-функції, кореляції між значеннями трафіку та Ateb-функції. Вісь абсцис показує значення часу, а вісь ординат значення, що залежать від часу, відповідно.

1. Спадне меню Function призначене для вибору конкретної Ateb-функції, з якою порівнюватиметься трафік.
2. Лічильник Interval призначений для вибору інтервалу розрахунку різниці між значеннями трафіку та Ateb-функції.
3. Лічильник Step призначений для вибору кроку розрахунку різниці між значеннями трафіку та Ateb-функції.
4. Лічильник Min interval призначений для встановлення мінімального періоду функції при пошуку найкращої кореляції.
5. Лічильник Max interval призначений для встановлення мінімального періоду Ateb-функції при пошуку найкращої кореляції.

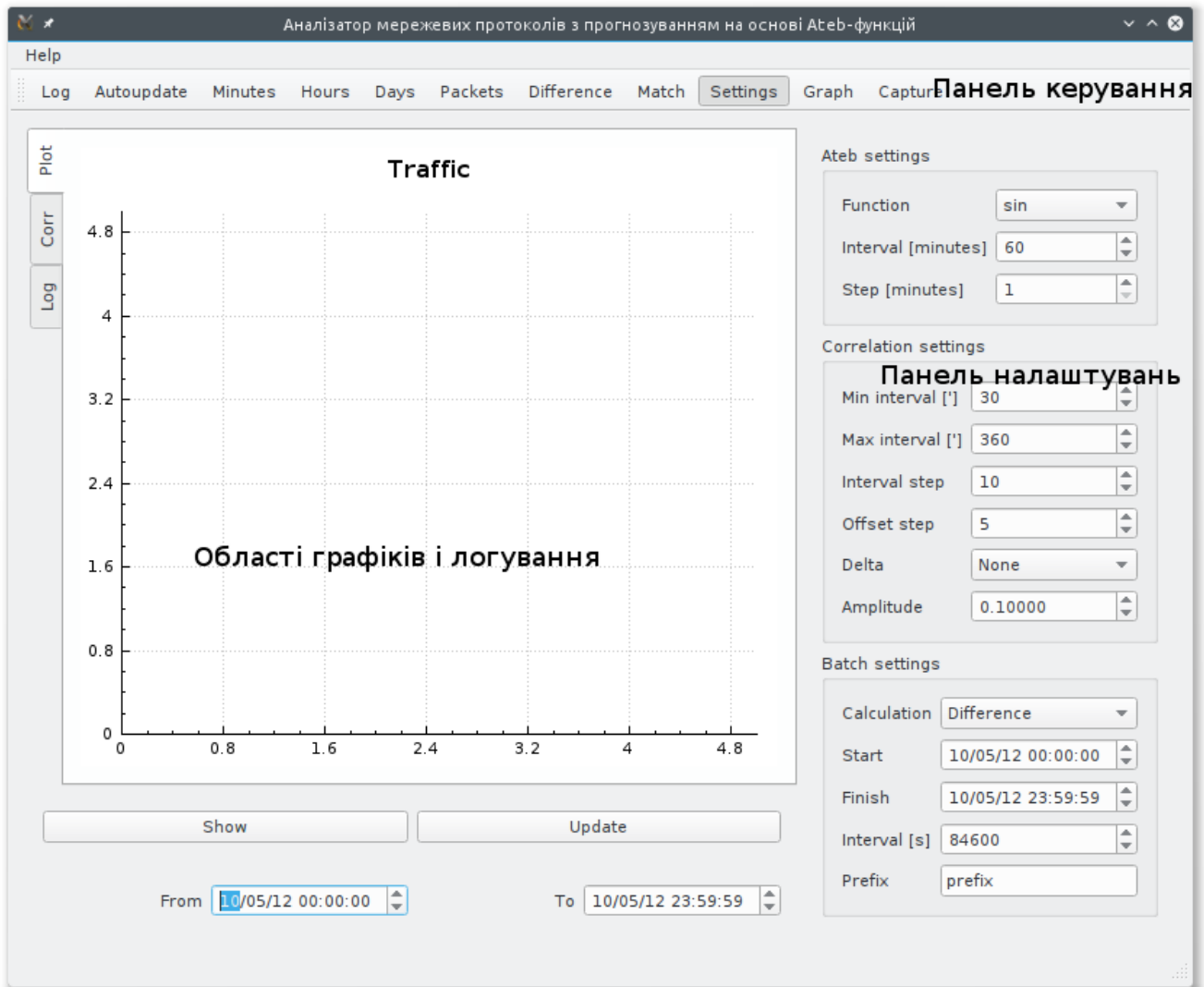


Рис 3.12. Головне вікно аналізатора трафіку.

6. Лічильник Interval step призначений для встановлення інтервалу перебору можливих періодів Ateb-функції при пошуку найкращої кореляції.
7. Лічильник Offset step призначений для встановлення інтервалу перебору можливих зсувів періоду Ateb-функції при пошуку найкращої кореляції.
8. Спадне меню Delta призначений для встановлення типу випадкової функції, яка додається до значень Ateb-функції при пошуку найкращої кореляції.
9. Лічильник Amplitude призначений для встановлення масштабного коефіцієнту для додавання значень дельта функції та Ateb-функції при пошуку найкращої кореляції.

The image shows a settings panel with three sections:

- Ateb settings:**
  - Function:
  - Interval [minutes]:
  - Step [minutes]:
- Correlation settings:**
  - Min interval []:
  - Max interval []:
  - Interval step:
  - Offset step:
  - Delta:
  - Amplitude:
- Batch settings:**
  - Calculation:
  - Start:
  - Finish:
  - Interval [s]:
  - Prefix:

Рис. 3.13 Панель налаштування розробленої інформаційної технології

- 10.Спадне меню Calculation призначене для встановлення режиму роботи в режимі пакетної обробки.
- 11.Лічильники Start та Finish призначені для встановлення початку та кінця інтервалу в режимі пакетної обробки.
- 12.Лічильник Interval призначений для встановлення інтервалу обробки в режимі пакетної обробки.
- 13.Текстове поле Prefix дозволяє встановити префікс для файлів зображення, що зберігаються в режимі пакетної обробки.

### 3.3.2 Використання системи керування базами даних PostgreSQL у інформаційній технології аналізу та прогнозування трафіку комп'ютерних мереж

Для використання серверу баз даних PostgreSQL, під час з'єднання в полях діалогу необхідно вказати:

1. Ім'я хоста (Host)
2. Ім'я бази даних (Database Name)
3. Ім'я користувача (User)
4. Пароль користувача (Password)
5. Номер мережевого порта (Port)

Після встановлення цих параметрів потрібно натиснути кнопку ОК для спроби під'єднання до бази даних. При невдалій спробі під'єднання необхідно перезавантажити програмне забезпечення.

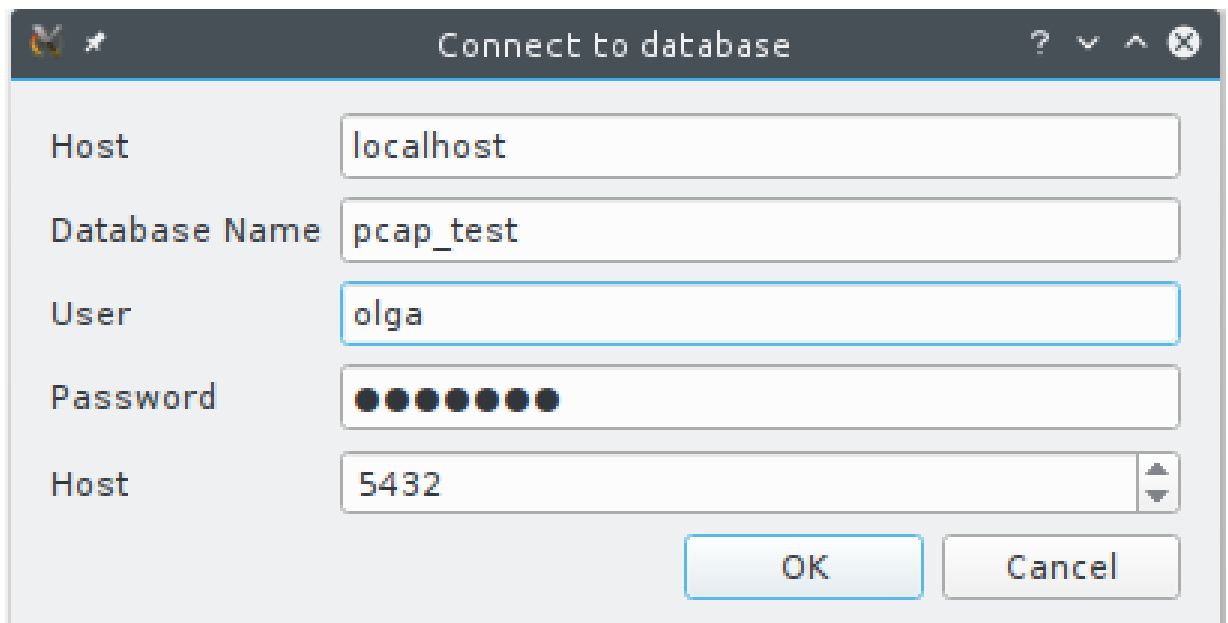


Рис. 3.14 Діалог підключення до бази даних

Моніторинг мережі – це важливе практичне завдання. У розглянутому завданні моніторинг виконує збір даних для побудови значень зразків прогнозованого трафіку з метою ефективнішого обслуговування самоподібного трафіку.

### 3.4 Метод короткострокового прогнозування інтенсивності трафіку даних в комп'ютерній мережі та його програмна реалізація

Як зазначено у розділі 2, математичний апарат Атеб-функцій дав можливість розв'язати аналітично системи диференціальних рівнянь, що описують суттєво нелінійні процеси у системах з одним ступенем вільності [62].

Також у [63] доведено, що косинус Атеб-функції є періодичним з періодом  $2\Pi(m, n)$ ,

$$\text{де } \Pi(m, n) = \frac{\Gamma(\frac{1}{n+1})\Gamma(\frac{1}{m+1})}{\Gamma(\frac{1}{n+1} + \frac{1}{m+1})}, \quad (3.7)$$

де  $\Gamma(\frac{1}{m+1}), \Gamma(\frac{1}{n+1})$  – Гамма-функція.

Для моделювання використаємо концепцію добової ритміки, що викладена у роботі [15] та забезпечує обґрунтування методу статистичного опрацювання даних трафіку в комп'ютерній мережі.

Для прогнозування значень трафіку використовуємо наступне рівняння у вигляді [24, 96]

$$u = A \cdot \text{ca}(m, n, \omega), \quad (3.8)$$

де  $A$  – амплітуда реальних коливань трафіку.

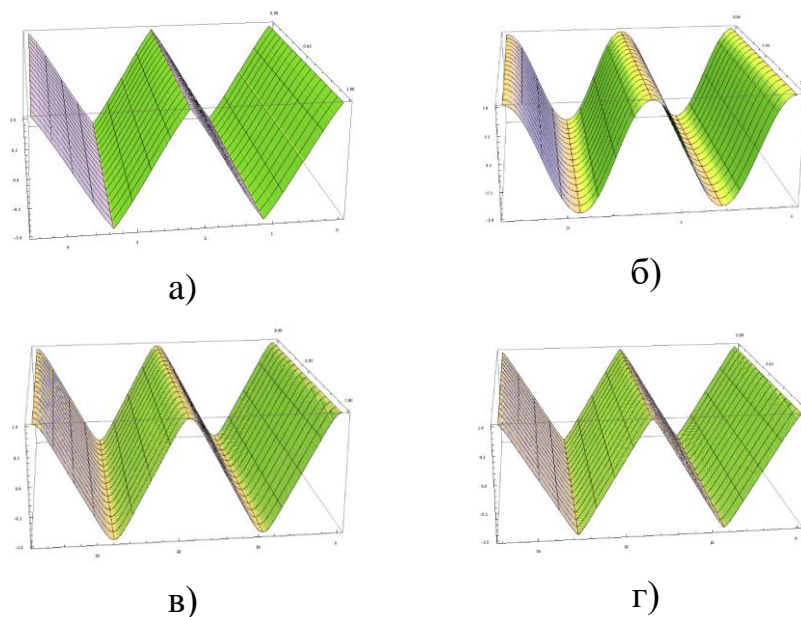


Рис.3.15 Графічне представлення  $\text{ca}(m, n, \omega)$  для а)  $m = 0.01, n = 0.1$ , б)  $m = 1, n = \frac{1}{3}$ , в)  $m = \frac{1}{7}, n = 1$ , г)  $m = 3, n = \frac{1}{7}$ .

Адаптивно вибираючи значення параметрів  $m$ ,  $n$  для косинуса Ateb-функції в залежності від довжини періоду реальних коливань трафіку з даних моніторингу як позначено на рис.3.15, отримуємо формулу для обчислення тренду трафіку мережі на протязі проміжку часу, що відповідає періоду між піковими навантаженнями у мережі. Відповідні значення обчислених півперіодів представлені у табл.3.2

У залежності від реальних даних моніторингу мережі (кількості пульсацій трафіку в одиницю часу) проміжок прогнозу тренду трафіку може змінюватись.

Для прикладу обчисленого у табл.3.2 та представленого на рис.3.15 середнє значення періоду пульсацій (пікових коливань трафіку) рівне 5 хв. Якщо прогнозоване значення інтенсивності навантаження у вузлі буде більше за задане значення максимальної пропускної спроможності даного вузла, то програмне забезпечення згенерує відповідне повідомлення стосовно перерозподілу навантаження у мережі.

Функція Ateb-косинуса вибудовується в залежності від значень параметрів  $m$ ,  $n$ , що показано на рисунку 3.15.

В результаті роботи програмного забезпечення параметри трафіку візуально відображаються на графіках та формуються відповідні рекомендації про перерозподіл навантаження у мережі.

### **Значення півперіоду функції Ateb-косинуса в залежності від параметрів $m$ , $n$**

*Таблиця 3.2.*

Значення параметрів $m$ , $n$	Значення півперіоду $\Pi$ за формулою (5) (рад.)	Обчислене значення часу прогнозування тренда трафіку (хв.)
$m = 0.01, n = 0.1$	1.110	0.883
$m = \frac{1}{3}, n = 1$	2.392	1.903
$m = 1, n = \frac{1}{3}$	2.392	1.903
$m = \frac{1}{7}, n = 1$	2.171	1.728
$m = 1, n = 1$	3.141	2.499

$m=3, n=\frac{1}{7}$	4.192	3.337
----------------------	-------	-------

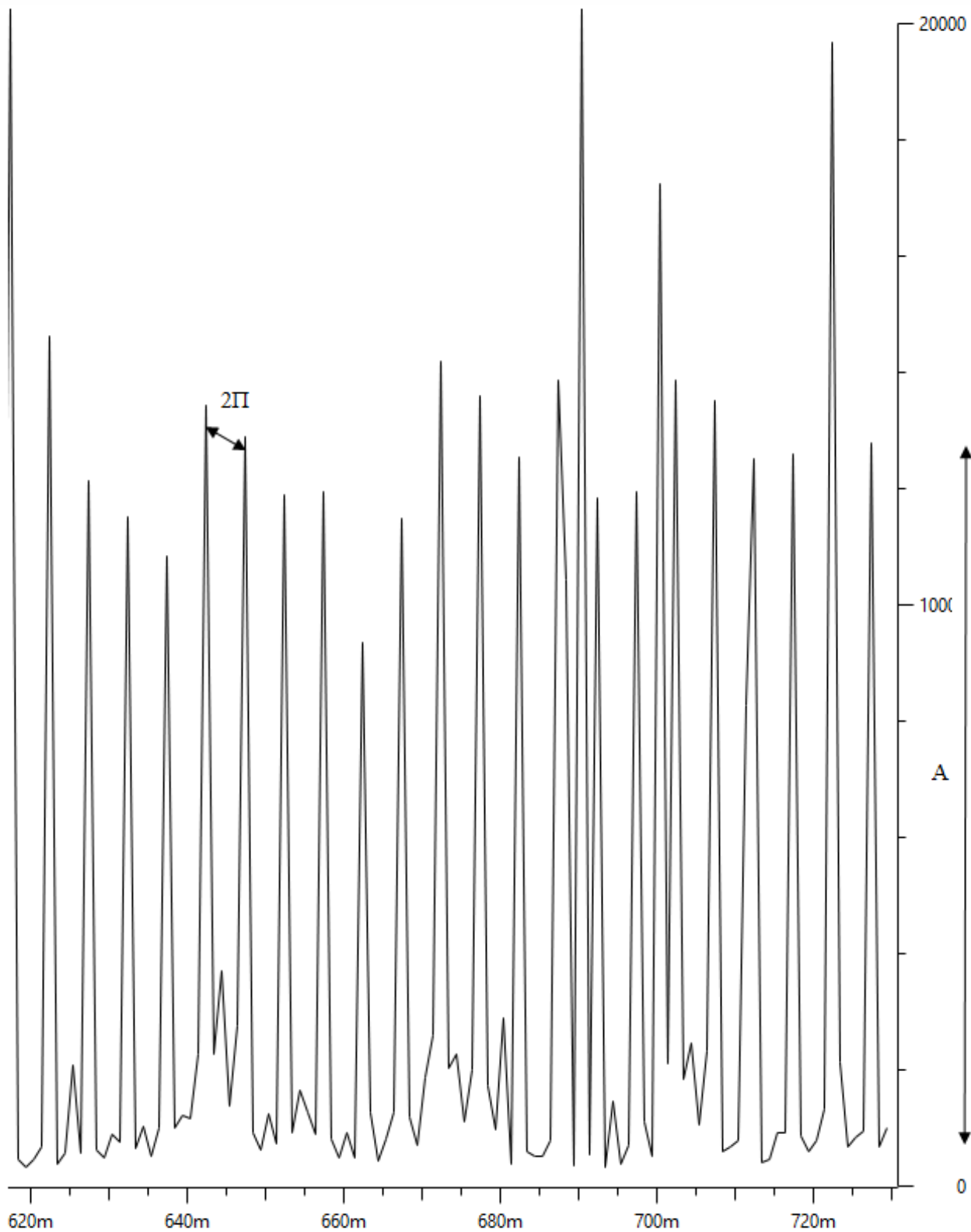


Рис.3.16 Частина даних трафіку (1 год. 40 хв.) у комп'ютерній мережі кафедри АСУ  
НУ «ЛП», А-амплітуда, П-півперіод (05.05.2015).



В залежності від прогнозованих значень інтенсивності завантаження мережного обладнання, експериментальним чином було визначено, що перемикання на альтернативні шляхи доставляння пакетів необхідно здійснювати при 50 (зелений колір) - 55 (червоний колір) % прогнозованій інтенсивності завантаження буфера вузлового обладнання [110].

Експерименти проводились на вузловому обладнанні комп'ютерної мережі Інституту теоретичної та прикладної інформатики Польської Академії Наук. Рівні завантаженості буфера, зображені на рис. 3.17.

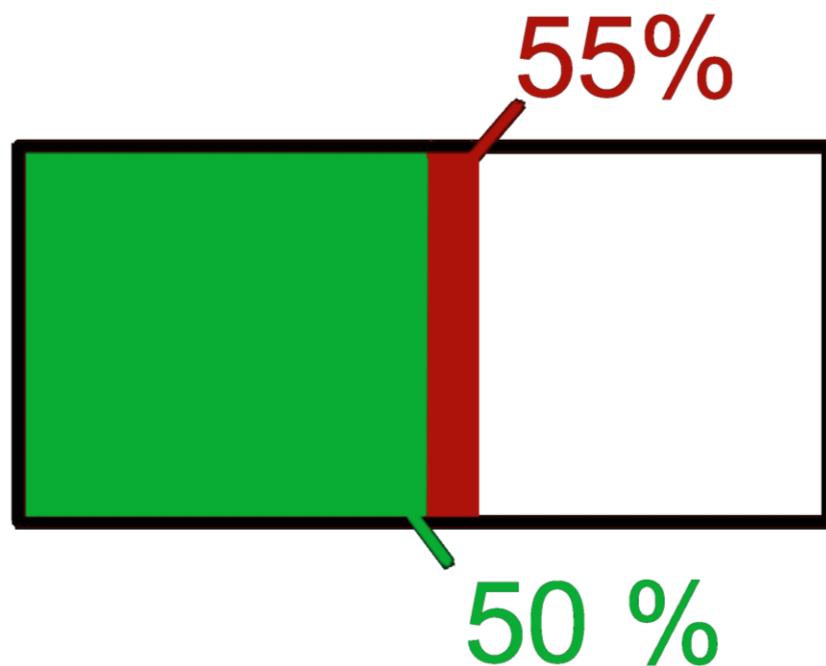


Рис. 3.17 Схематичне зображення буфера вузлового обладнання комп'ютерної мережі та рівнів його завантаженості.

На основі математичного апарату Атеb-функцій та отриманих зразків моніторингу комп'ютерної мережі здійснено прогнозування значень інтенсивності трафіку в мережі. Основною перевагою розробленого методу є використання однієї математичної формули для визначення значень трафіку та здійснення балансування інтенсивності навантаження буферів вузлового обладнання у комп'ютерній мережі.

Ефективність розробленого методу показана експериментально з використанням моніторингу мережі розробленими методами інформаційної технології (див. розділ 4).

### 3.5 Знаходження найкоротшого шляху в графі. Класичний алгоритм Дейкстри (Dijkstra).

На сьогоднішній день теорія графів використовується у багатьох науках. Однак одні з найкращих практичних застосувань відбувається при вирішенні завдання пошуку та розроблення оптимальних алгоритмів для знаходження маршрутів для даних у комп'ютерних мережах.

Для кращого розуміння викладеного далі матеріалу покажемо визначення основних термінів, які використовуються у теорії графів [60].

Вершиною в теорії графів є базовий елемент, що використовується при створенні графа. На рисунках, які являють собою граф, вершина як правило представляється у вигляді кружка з міткою, а ребро - це лінія або дуга-стрілка, що з'єднує вершини.

Граф – це певна множина вершин і деяка множина ребер, що сполучають пари різних вершин.

Орграф (орієнтований граф) – це граф, що містить орієнтовані ребра. Неорієнтованим графом, відповідно, називається такий, що містить неорієнтовані ребра. Іноді доцільно розглядати неорієнтований граф як орієнтований, у якого є по два ребра у кожному напрямку.

Матриця суміжності графа – це матриця булевих (0/1) значень розмірності  $V \times V$ , де  $V$  – кількість вершин графа,  $[i,j]$  елемент якої, приймає значення 1 (true), якщо у графі є ребро, що сполучає вершину  $i$  з вершиною  $j$ , і 0 (false), якщо такого ребра немає.

Стандартне зображення графа, якому зазвичай надають перевагу, коли граф не відноситься до розряду насичених, називається зображенням у вигляді списку суміжних вершин, в рамках якого відслідковуються всі вершини, з'єднані з кожною вершиною, включеною у зв'язний список цієї вершини.

Кожен шлях у зваженому орграфі асоціюється з вагою шляху. Вага шляху – це величина, яка є сумою всіх ваг ребер, які входять до цього шляху. Ця обставина дозволяє нам сформулювати таку задачу як «знайти шлях між двома заданими

вершинами, що має найменшу вагу». Для лаконічності зважені орграфи будемо далі називати мережами [60].

Отже, найкоротшим шляхом між двома вершинами  $s$  і  $t$  в мережі називається такий направлений простий шлях із  $s$  в  $t$ , що ніякий інший шлях не має нижчої ваги. Це визначення лаконічне, але за ним приховуються всі переваги. По-перше, якщо в  $t$  із  $s$  потрапити неможливо, то ніякого шляху не існує взагалі, а отже, немає і найкоротшого шляху. По-друге, може існувати декілька шляхів з одною і тою ж вагою з однієї вершини в іншу і у такому випадку задовольняємось тим, що виділяємо один з них.

Для визначення найкоротшого шляху з однієї вершини до іншої одним із способів є побудова дерева найкоротших шляхів [60, 88]. Дерево найкоротших шляхів визначає найкоротші шляхи з кореня в інші вершини. У загальному випадку застосування різні шляхи можуть мати одну і ту ж довжину, тому може існувати декілька таких дерев, які визначають найкоротші шляхи з даної вершини.

Щоб знайти найкоротші шляхи у зваженому неорієнтованому графі, будуємо мережу з тими ж вершинами і двома ребрами (по одному в кожному напрямку), які відповідають кожному ребру у вихідному графі. Існує взаємно однозначна відповідність між простими шляхами у графі і простими шляхами в мережі, а вартості шляхів одні і ті ж. Таким чином, проблеми найкоротших шляхів для них еквівалентні. Коли ми будуємо стандартні списки суміжності або зображення зваженого неорієнтованого графа у вигляді матриці суміжності, ми будуємо точно таку саму мережу. Іншими словами, алгоритми для мереж працюють однаково також і для зважених неорієнтованих графів. Така конструкція не буде продуктивною, коли ваги можуть бути від'ємними, оскільки тоді утворюються від'ємні цикли в мережі, а ми не знаємо, як вирішити проблему найкоротших шляхів у мережах з від'ємними циклами.

Класичний алгоритм Дейкстри базується на побудові дерев найкоротших шляхів [60, 88]. Для побудови цих дерев можна скористатись такою схемою: починаємо побудову шляхом розміщення джерела в дереві найкоротших шляхів, а потім будуємо це дерево, додаючи на кожному кроці одне ребро, завжди вибираючи

таке із наступних ребер, яке дає найкоротший шлях із джерела до вершини, що не міститься у цьому дереві. Іншими словами, ми додаємо вершини до дерева найкоротших шляхів в порядку зростання їх відстані (на дереві) від стартової вершини. Цей метод і отримав назву алгоритму Дейкстри (Dijkstra) [60,88].

Алгоритм Дейкстри вирішує задачу відшукування найкоротших шляхів для єдиного джерела на мережах, які мають невід’ємні ваги. Якщо би ребра мали від’ємні ваги, то алгоритм перестав би функціонувати, оскільки припускається, що в процесі додавання вершин до дерева найкоротших шляхів довжина шляху при цьому не зменшується. У мережі з від’ємними вагами таке припущення несправедливе, оскільки будь-яке ребро, що веде в деяку вершину дерева і має досить велику від’ємну вагу, може дати коротший шлях, який веде в цю вершину, ніж шлях у дереві.

Варто пригадати, що крім дерева найкоротших шляхів при виконанні алгоритму будується так звана кайма (fringe), яка містить ребра, що виходять з листків дерева і ще не містяться в цьому дереві. Тому кожен крок алгоритму Дейкстри складається з двох частин:

- Створення кайми;
- Додавання до дерева найкоротших шляхів вершини з кайми, відстань до якої від джерела є найменшою.

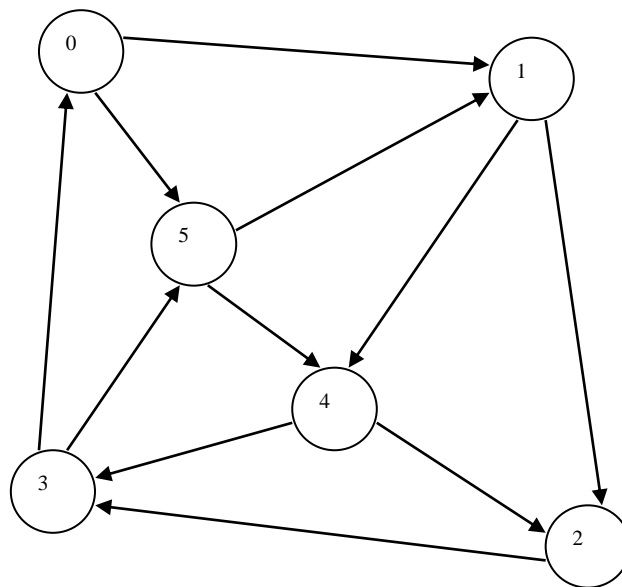


Рис.3.18 Орієнтований зважений граф.

### Ваги переходів орієнтованого графа

Таблиця 3.3.

Перехід	Вага
0-1	0,41
1-2	0,51
2-3	0,50
4-3	0,36
3-5	0,38
3-0	0,45
0-5	0,29
5-4	0,21
1-4	0,32
4-2	0,32
5-1	0,29

Наглядно це демонструється на прикладі. Нехай нам задано граф, зображений на рис. 3.18. Ваги переходів наведені у табл. 3.3. Далі на рисунках показана побудова дерева найкоротших шляхів для зображеного на рис. 3.18 графа із коренем у вершині 0.

Виділеними чорними лініями на рисунках 3.19 – 3.22 показані ребра дерева, а виділеними сірими – ребра кайми.

На першому кроці додаємо вершину 0 до дерева, а ребра, які з неї виходять (0-1 і 0-5) – до кайми (рис.3.19). На другому кроці (рис.3.20) ми переміщуємо найкоротше з них (0-5) із кайми в дерево і перевіряємо ребра, які від нього відходять: ребро 5-4 додається до кайми, а ребро 5-1 викидається, оскільки воно вже включене до дерева найкоротших шляхів. Пріоритет ребра 5-4 в каймі визначається довжиною шляху з 0, тобто 0-5-4.

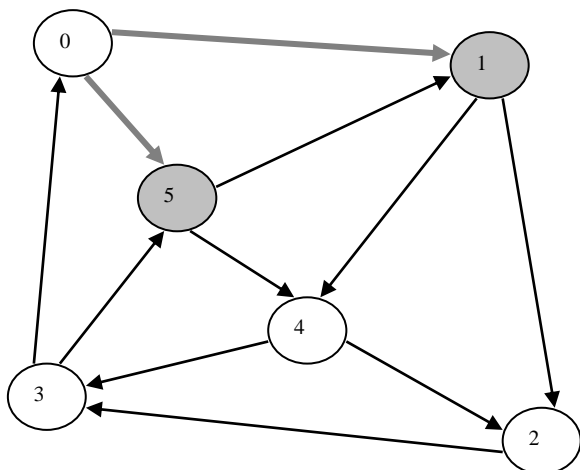


Рис.3.19

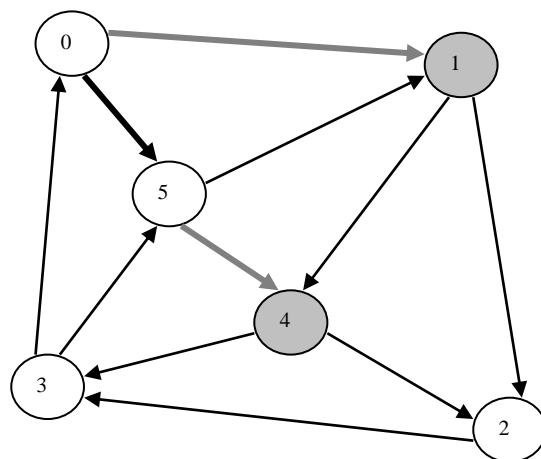


Рис.3.20

На третьому кроці (рис.3.21) ми переміщуємо 0-1 із кайми в дерево, додаємо до кайми 1-2 і викидаємо з неї 1-4. На четвертому кроці (рис. 3.22) ми переміщуємо 5-4 із кайми в дерево, додаємо 4-3 до кайми і заміняємо 1-2 на 4-2, оскільки шлях 0-5-4-2 коротший, ніж 0-1-2. Ми тримаємо в каймі не більше одного ребра, що веде до кожної вершини, вибираючи з них таке, яке лежить на найкоротшому шляху від кореня (вершини 0).

На п'ятому кроці (рис.3.23) ми додаємо до дерева ребро 4-2 і викидаємо його з кайми. І на останньому, шостому, кроці переміщуємо з кайми і дерево єдине ребро 4-3 і завершуємо тим самим побудову дерева найкоротших шляхів.

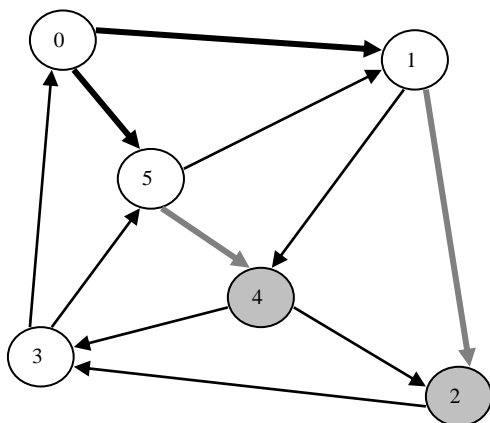


Рис.3.21

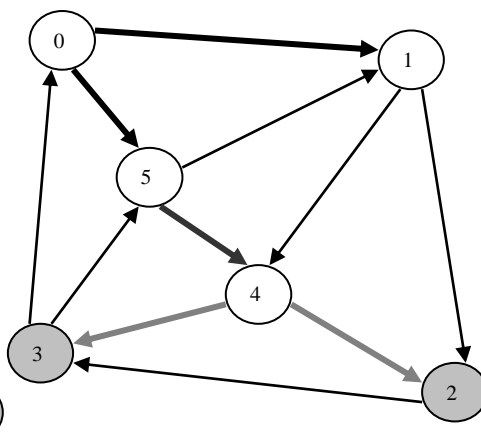


Рис.3.22

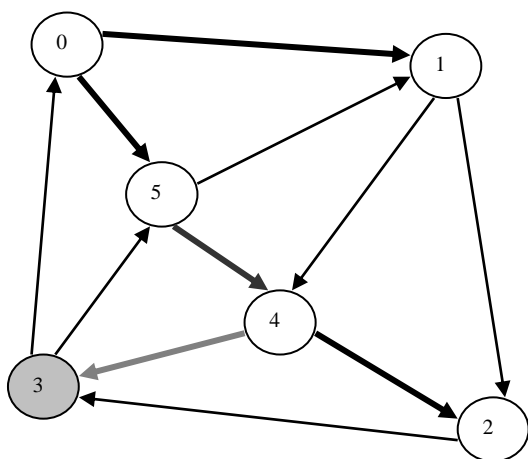


Рис.3.23

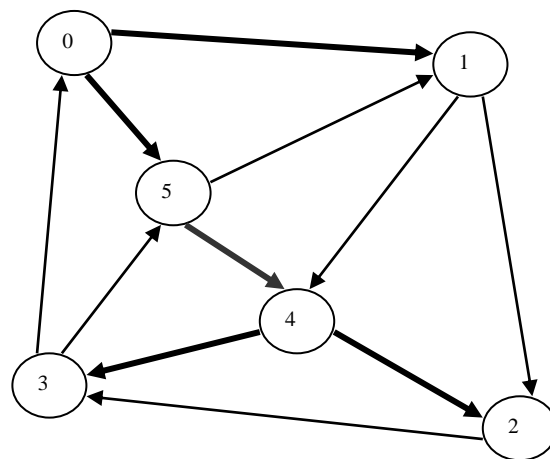


Рис.3.24

Назва алгоритму Дейкстри як правило використовується для позначення як абстрактного методу створення дерева мінімальних шляхів додаванням вершин в порядку зростання їх відстані від джерела, так і його реалізації як алгоритму з часом, пропорційним  $V^2$  [90], оскільки Дейкстра показав і перше і друге у своїй статті, опублікованій у 1959 році.

Дерево найкоротших шляхів після останньої ітерації буде мати такий вигляд:

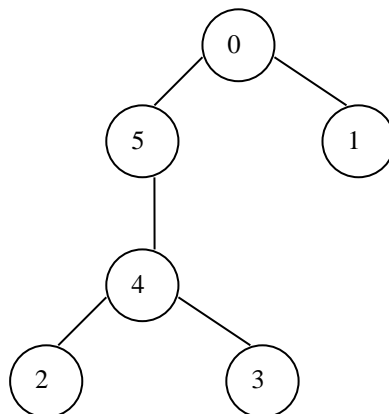


Рис.3.25. Дерево найкоротших шляхів.

Існують чотири основні реалізації алгоритму Дейкстри. Розглянутий метод в літературі ще називають класичним і підходить він для переважної більшості випадків, крім того він є відносно простим, тому в цій роботі оберемо саме його.

Щодо трьох інших реалізацій, то вони відрізняються вмістом черги з пріоритетами:

- Ребра кайми;
- Вершини кайми;

- Усі вершини.

### **3.6. Використання даних The Opte Project для тестування розробленої інформаційної технології**

Проект The Opte Project - проект, створений Б. Ліоном [127], який за допомогою цього проекту прагне створити дуже точне уявлення про масштаби сучасного Інтернету з використанням візуальної графіки (Рис.3.26). Назва цього проекту походить від грецького слова Optos, що означає "бачити". Ця назва була придумана творцем проекту.

Проект було розпочато у жовтні 2003 року як спроба забезпечити людям корисну Інтернет-карту з відкритим вихідним кодом. Ліон вважає, що відображення всесвітньої комп'ютерної мережі дасть можливість студентам краще вивчати та візуалізувати дані про Інтернет. Цей проект також може бути використаний для візуалізації ділянок катастроф в світі, посиляючись на значні руйнування можливостей Інтернету після стихійного лиха. Крім того, дані проекту можуть бути використані як детектори, які відображають розростання Інтернету та області цього збільшення з часом.

Проект отримав підтримку людей в усьому світі та є частиною каталогів Бостонського музею науки, Музей сучасного мистецтва та Лувру.

Результатом цього стало зображення Інтернету, яке тепер демонструється в Музеї сучасного мистецтва в Нью-Йорку.

Дані з цього проекту зокрема використовувались для проведення експериментів на вузловому обладнанні комп'ютерної мережі Інституту теоретичної та прикладної інформатики Польської Академії Наук. Рівень завантаженості буфера та дії, пов'язані з досягненням певних рівнів завантаженості, зображені на рис. 3.17.

Дані The Opte Project широко використовуються в різних наукових дослідженнях. У праці [117] Нич визначає метод для вилучення частини графа, який відповідає топології мережі (Інтернет), яка охоплює певну область. Метод



апробується на даних, зібраних в рамках проекту The Orpe Project та описують топологію Інтернету.

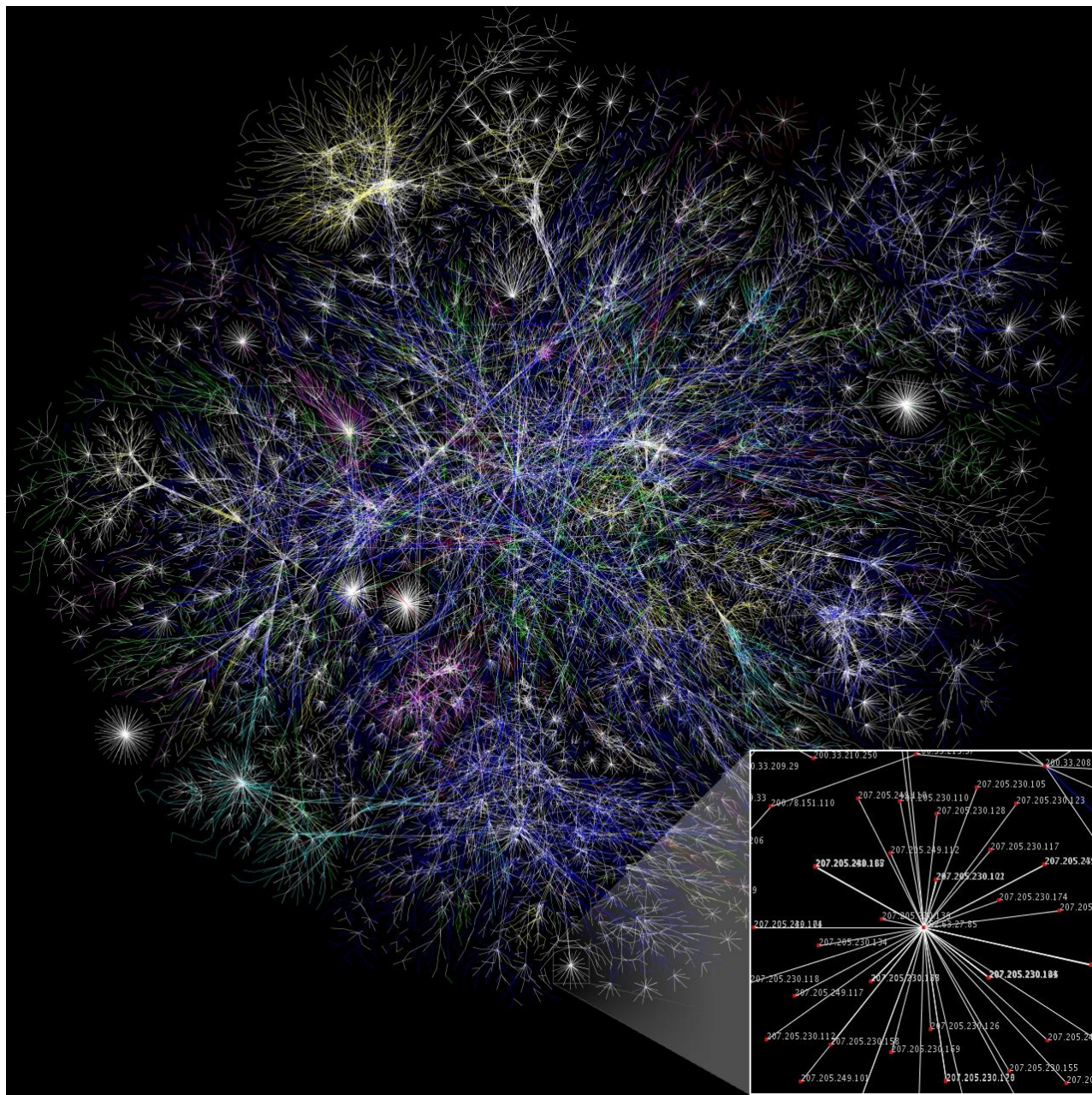


Рис. 3.26 Візуалізація даних The Orpe Project та частини Інтернету в 2005 році

Витягнуті та візуалізовані частини графів були проаналізовані з точки зору числа сусідів, найдовшої довжини шляху та існування циклів. Наступним кроком отримані значення топології використовуються для моделювання перехідних процесів поведінки глобальних мереж з використанням апроксимації потоків даних.

Зокрема, Моніка Ніч [118] використовує їх для розроблення підходу до чисельного моделювання динаміки потоків даних в широкій області комп'ютерних мереж. Метою цього дослідження є вивчення можливості передавання значень

даних моделювання з додатку напряму в базу даних, долаючи таким чином необхідність розробляти спеціалізовані рішення. Автори реалізували логіку моделі в процедурах SQL та виконали математичні розрахунки для показово великої топології. Експерименти показали, що ядро бази даних може бути використано для виконання всіх модельних розрахунків.

Також дані цього проекту знайшли своє застосування в медичних розробках. У праці Лоузада та колег [114] ці дані використовуються для дослідження та візуалізації роботи нейронів людського мозку. У цій праці автори перевіряють результати своїх досліджень. для штучно створених мереж і двох реальних, а саме мережі Інтернету та природньої нейронної мережі.

У роботі [129] французькі вчені працювали над створенням веб-інтерфейсу для аналізування та візуалізації великих обсягів даних, займались вивченням обсягів даних, проблемою побудови таких зображень.

Крім того, карта використовується як піктограма того, як виглядає Інтернет в сотнях книг, в кінострічках, музеях, офісних будівлях, навчальних дискусіях та численних публікаціях. Карта також стала інструментом навчання, що дозволяє людям, які найкраще сприймають інформацію візуально, швидко зрозуміти, що таке Інтернет та осягнути його масштаби.

Зображення розповсюджуються під ліцензією Creative Commons, що дозволяє будь-кому використовувати його для некомерційних цілей. Для комерційного використання, існує єдиний одноразовий ліцензійний збір, який потрібно сплатити у разі використання зображень, але призначений він для підтримки цього проекту та створення нових карт.

### **3.7 Вдосконалення методу маршрутизації трафіку у вузловому обладнанні комп'ютерної мережі**

Маршрутизація у сучасних комп'ютерних мережах має великий вплив на їх функціонування, експлуатацію, раціональне використання ресурсів. Одним з протоколів, який використовується для маршрутизації в сучасних комп'ютерних

мережах є протокол OSPF (Open Shortest Path First), який забезпечує передачу даних у найкоротшому шляху, для пошуку якого використовується класичний алгоритм Дейкстри. Однак цей протокол не забезпечує захисту ресурсів комп'ютерної мережі від перевантажень, що зумовлює потребу створення та вживання додаткових м'ір для їх ліквідації. Проблема високих перевантажень в комп'ютерних мережах, які використовують маршрутизацію за допомогою протоколу OSPF є надзвичайно актуальною на сьогодні [6].

Головною причиною виникнення перевантажень мережного обладнання в комп'ютерній мережі є передавання трафіку різних потоків лише одним спільним шляхом, визначеним за алгоритмом Дейкстри. В свою чергу, цей алгоритм будує дерево найкоротших шляхів на основі топології комп'ютерної мережі, в якій він працює, однак не враховує поточного стану її завантаження. Це спричиняє створення черг з інформаційних пакетів та виникнення затримки при передачі даних, тому що всі потоки йдуть через обладнання, розташоване на розрахованому найкоротшому маршруті, результатом чого стає його перевантаження.

У роботах [48,49] було запропоновано різні модифікації базового алгоритму Дейкстри, які враховували перевантаження вхідних каналів.

Візуалізація масштабів даних показана на рисунках 3.27-3.29, зокрема для ста, чотирьохсот та двох тисяч вузлів. Робота алгоритму на частинах обраних даних показана на рис. 3.30 – 3.35.

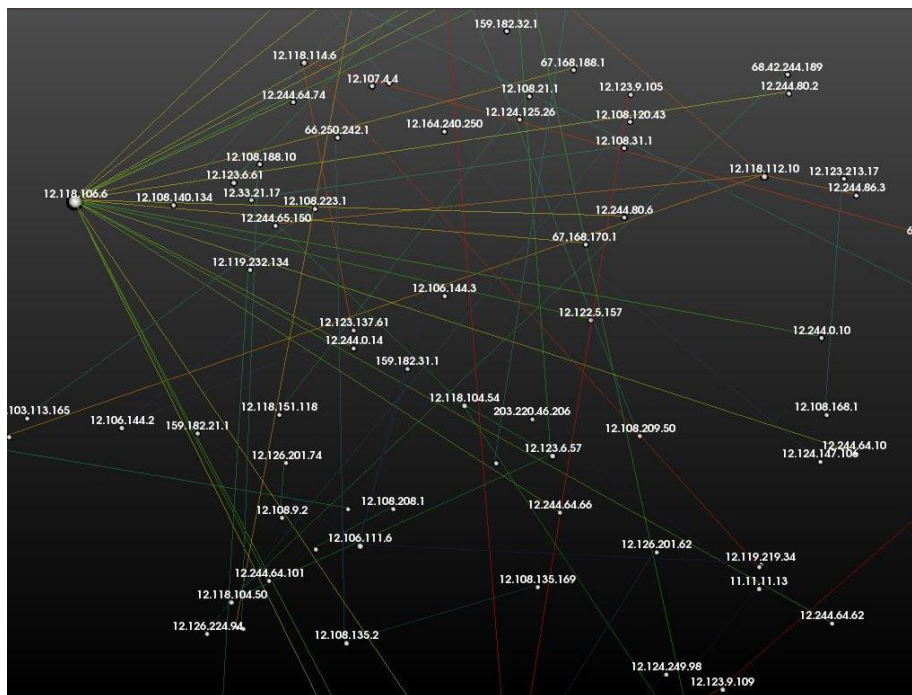


Рис.3.27 Візуалізація Інтернет-графу для 100 вузлів.

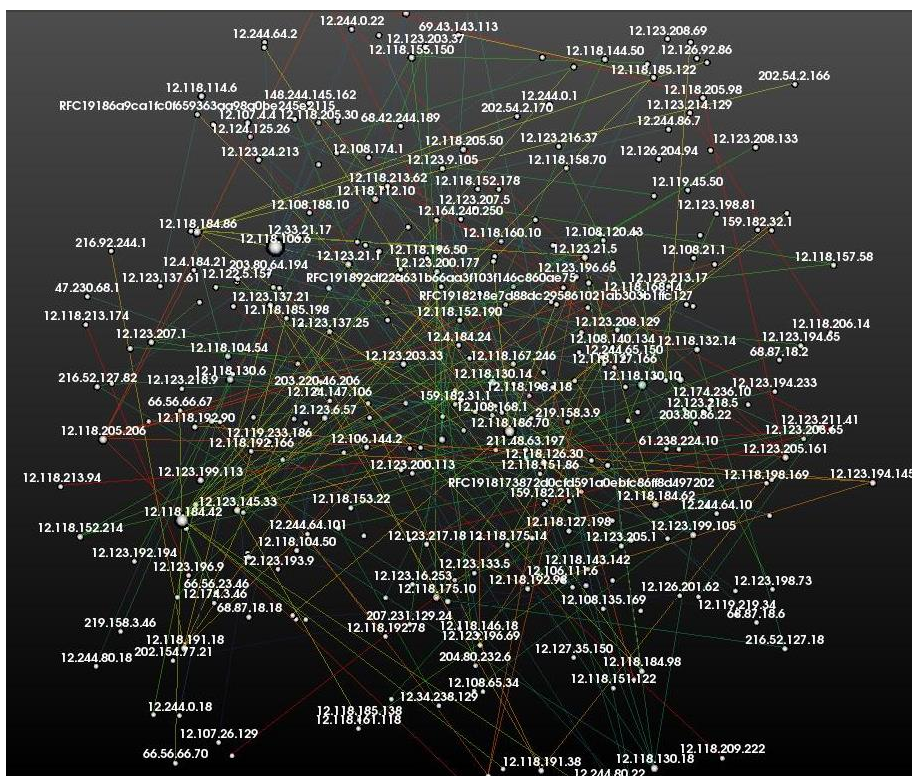


Рис.3.28 Візуалізація Інтернет-графу для 400 вузлів.



Рис.3.29 Візуалізація Інтернет-графу для 2000 вузлів.

Розроблений удосконалений метод маршрутизації трафіку було побудовано на основі математичної моделі для прогнозування трафіку в комп'ютерній мережі та використано для відображення шляхів між реальними вузлами мережі Інтернет, дані про які були взяті з проекту The Orpe Project [72, 119].

Топологія, отримана з даних проекту The Orpe Project зображена на рис. 3.30-3.31.

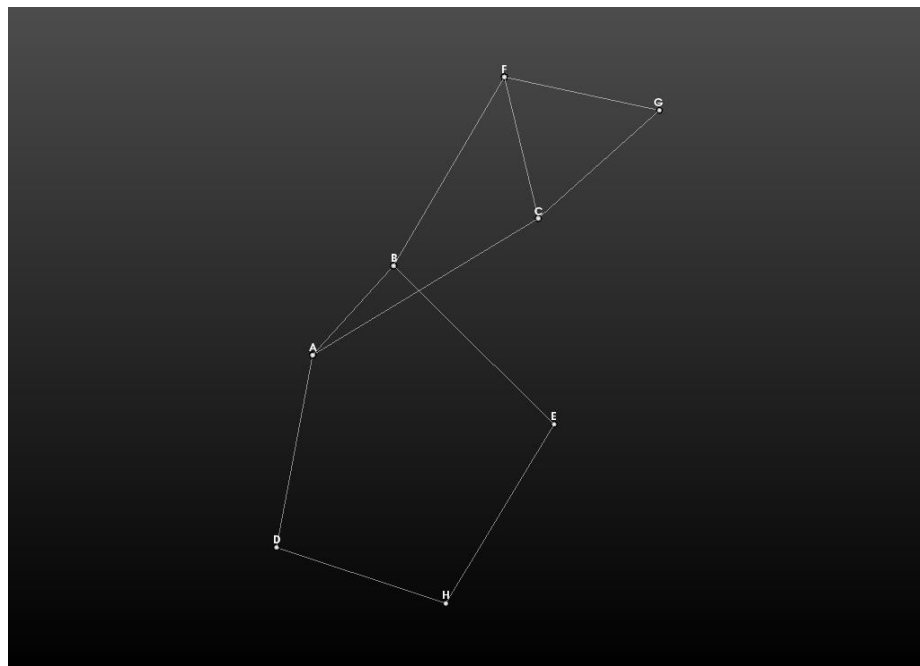


Рис.3.30 Візуалізація обраної топології з Інтернет-графу (на площині).

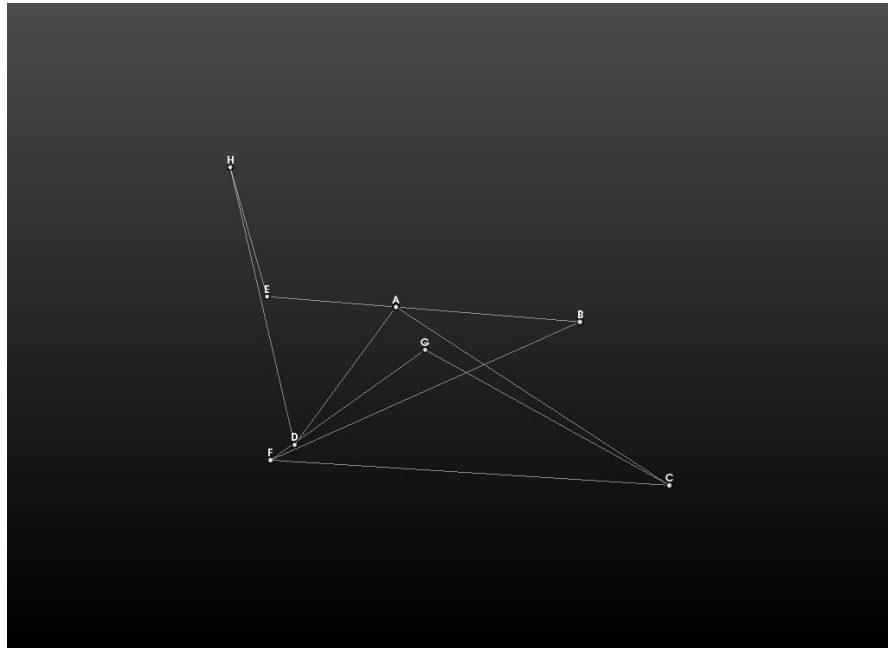


Рис.3.31 Візуалізація обраної топології з Інтернет-графу (в просторі).

Вікно для роботи з графами, зображене на Рис. 3.31, призначене для дослідження маршрутів у комп'ютерній мережі у вигляді графової моделі. В лівій частині вікна зображений граф, на якому позначено два найкращі шляхи між двома заданими вершинами (1 – зеленим кольором, 2 – червоним кольором). Синім кольором підсвічується вершина, яка є перевантаженою. Спадні меню Start та Finish дозволяють визначити та задати значення початкового та кінцевого вузлів графу для пошуку найкращих шляхів, а спадне меню Overload дозволяє обрати значення перевантаженої вершини. Таблиці в правій частині вікна показують найкращі шляхи між стартовою вершиною та кожною іншою вершиною, а також додаткові дані про вершини графа. Найкращий шлях підсвічується зеленим кольором. Кнопка Load дозволяє завантажувати та візуалізувати дані про мережу з текстового файлу. Завантажені з файлу дані автоматично відображаються.

Комунікація між вузлами комп'ютерної мережі відбувається за допомогою протоколу PPP (Point-to-Point Protocol) двоточковим протоколом канального рівня моделі OSI, який використовується для встановлення прямого зв'язку між двома вузлами комп'ютерної мережі, що забезпечує аутентифікацію з'єднання, шифрування та стиснення даних.

Суть роботи такого удосконаленого методу маршрутизації трафіку описується за допомогою таких кроків (спрацювання обчислення додатковим маршрутів

відбувається при прогнозування інтенсивності завантаженості буфера мережного обладнання на рівні 50%):

А. Пошук дерева найкоротших шляхів.

А.1. Задається топологія комп'ютерної мережі як зважена матриця суміжностей, яка зберігається в масиві  $A$ .

А.2. Будується масив  $X$ , в якому буде зберігатись та демонструватись знаходження найкоротшого шляху від вершини  $s$  (кореня дерева) до кожної з вершин, які залишились.

А.3. За допомогою класичного алгоритму Дейкстри відбувається пошук дерева найкоротших шляхів  $T$  від вершини  $s$  до всіх інших вершин.

Б. Далі відбувається створення головної маршрутної таблиці.

В. Обчислення альтернативних дерев найкоротших шляхів, що можуть бути використані при перевантаженні того чи іншого вузла, та створення маршрутних таблиць відповідно результатів роботи удосконаленого методу маршрутизації.

В.1. Створюється матриця вершин  $A$  і вектор пар мінімальних відстаней векторів вершин  $B$ .

В.2. Перевіряється, чи є зв'язок між початковою та кінцевою вершинами.

В.3. За допомогою класичного алгоритму Дейкстри обчислюється найкоротший шлях між початковою та кінцевою вершинами, який стає першим рядком матриці  $A$ .

В.4. Вузол відгалуження варіюється від першого до передостаннього вузла в попередньому  $k$ -му найкоротшому шляху.

В.5. Формується кореневий шлях від початкового вузла до вузла відгалуження попереднього  $k$ -го найкоротшого шляху [22, 94].

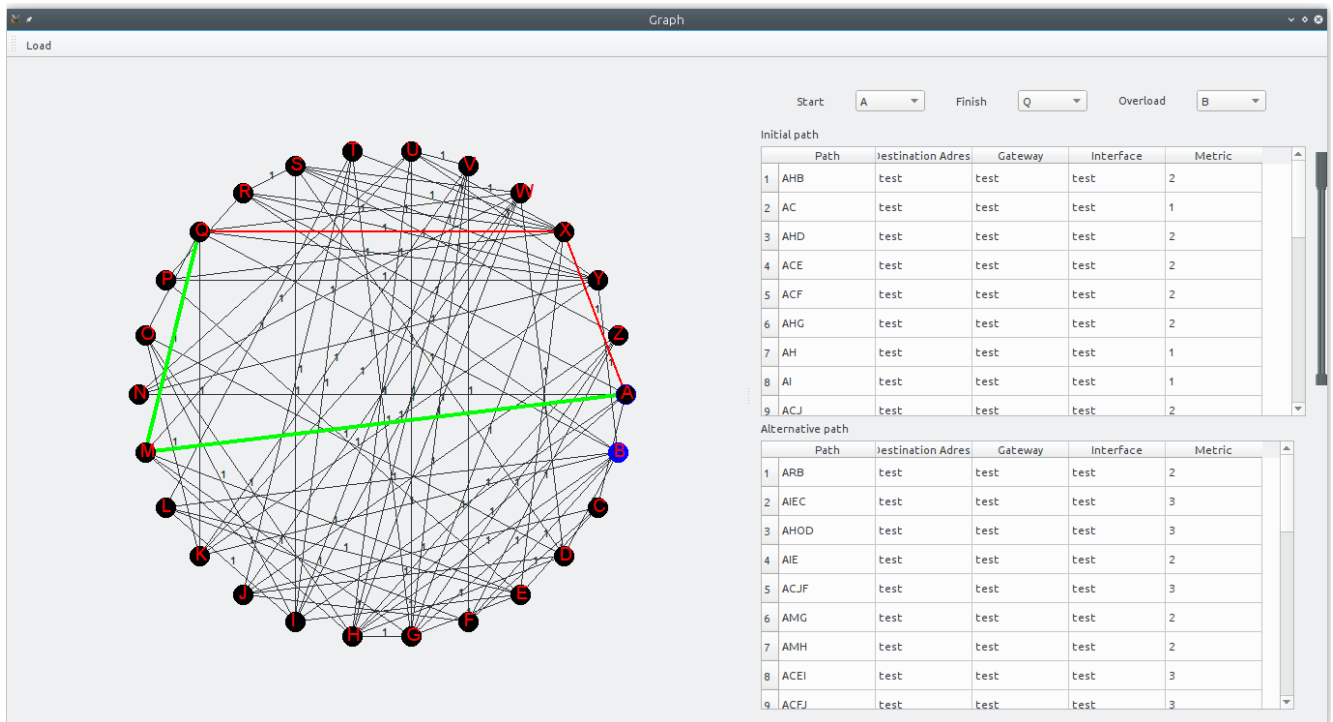


Рис.3.32 Тестовий вигляд програми пошуку альтернативного шляху

В.6. Для кожного шляху в матриці А видаляються зв'язки, які є спільними з кореневим шляхом.

В.7. З графу видаляється кожен вузол, який належить до кореневого шляху, окрім вузла відгалуження.

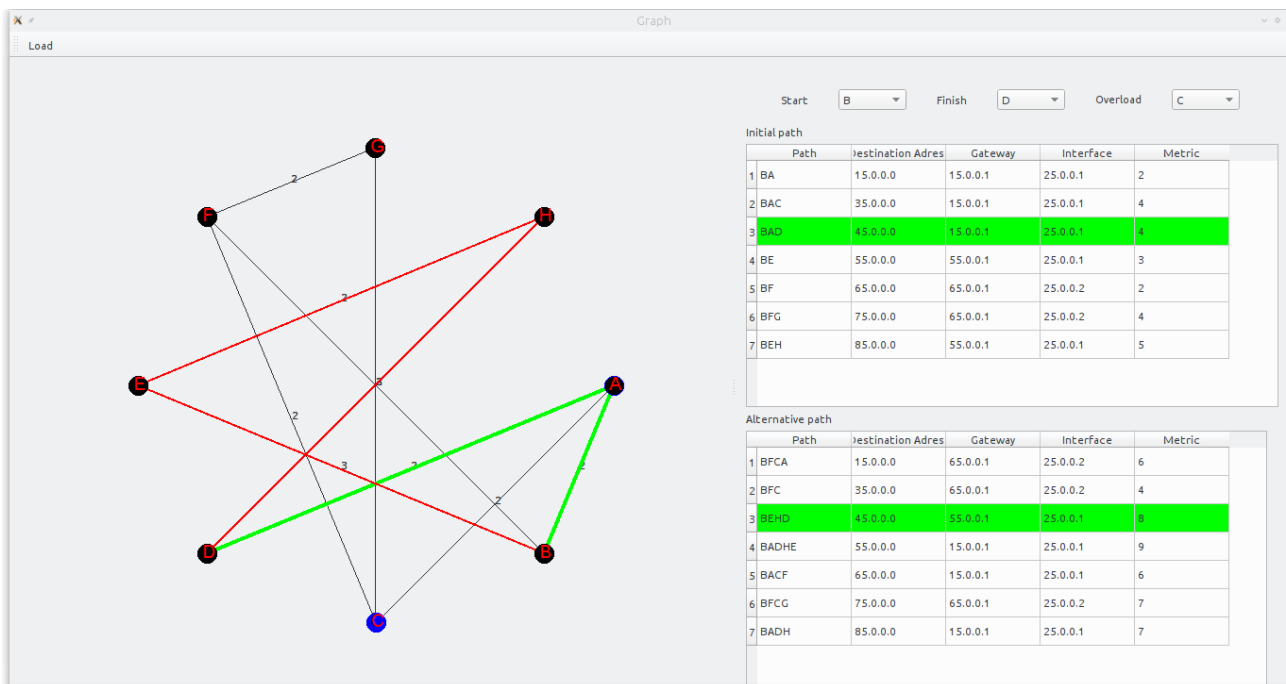


Рис.3.33 Пошук шляхів від вузла В до вузла D через перевантажений вузол С



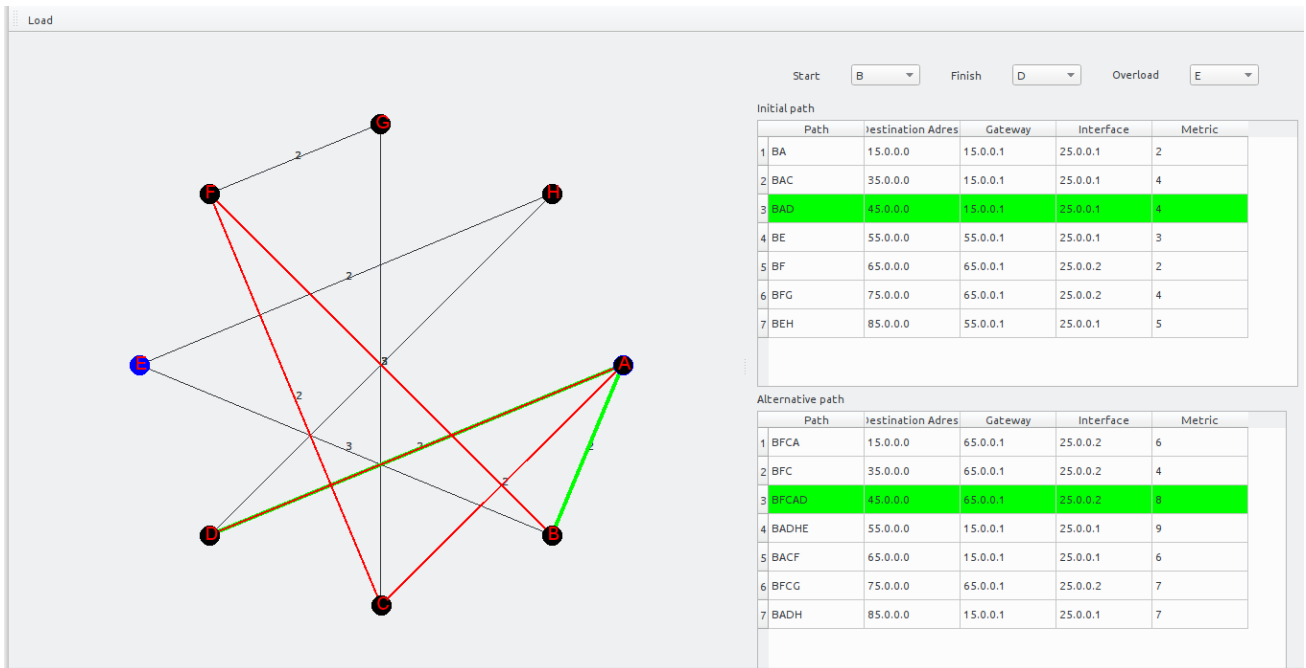


Рис. 3.34 Пошук шляхів від вузла В до вузла D через перевантажений вузол E

В.8. Обчислюється шлях відгалуження, який іде від вузла відгалуження до кінцевого вузла.

В.8. Обчислюється шлях відгалуження, який іде від вузла відгалуження до кінцевого вузла.

В.9. Повний шлях створюється на основі конкатенації кореневого шляху і шляху відгалуження. Цей шлях додається до вектора В. Всі видалені зв'язки та вершини відновлюються.

В.10. Якщо вектор В не містить елементів, алгоритм переривається. В іншому випадку вектор В сортується, за найменшим значенням ваги. Другий елемент елемента вектора В з найменшою вагою додається до матриці А і видаляється з вектора В.

В.11. Після отримання необхідної кількості шляхів у матриці А, алгоритм переривається.

Наведемо приклади роботи удосконаленого методу маршрутизації трафіку.

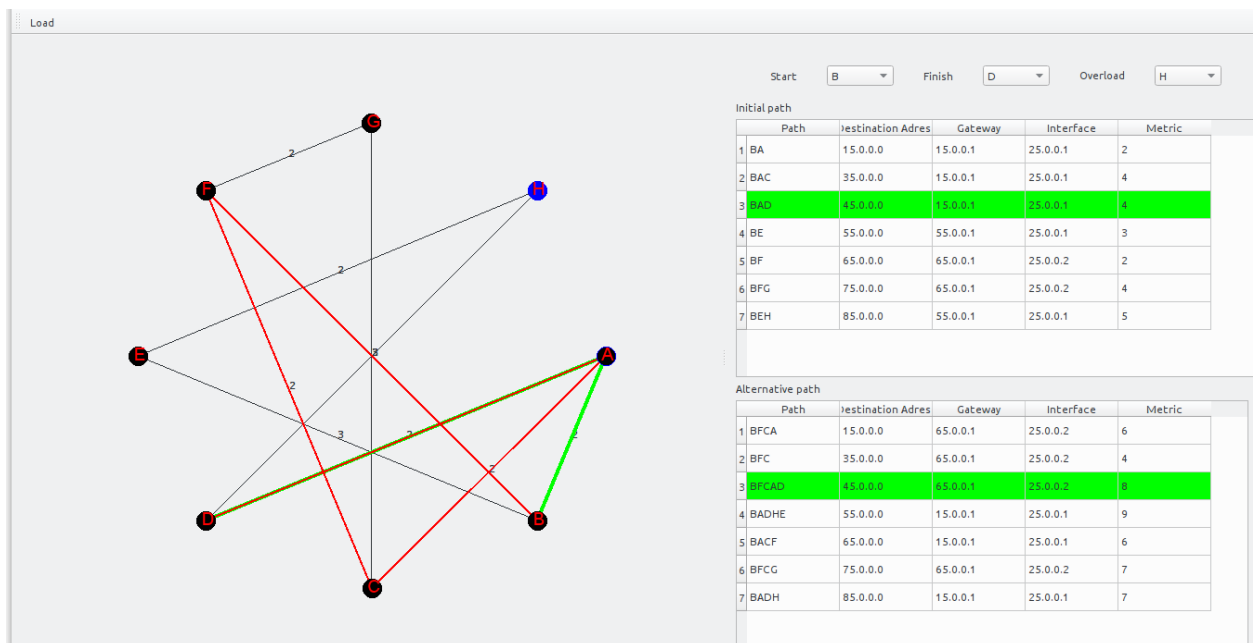


Рис. 3.35 Пошук шляхів від вузла В до вузла D через перевантажений вузол H

При умові знаходження декількох альтернативних шляхів, котрі є рівними між собою, відбувається вибір одного з них за правилом лівої руки. Вибір здійснюється у вузлі, в якому відбувається пошук альтернативних шляхів з метою уникнення перевантаження вузлового обладнання.

За відсутності перевантажень в мережі використовується класичний спосіб маршрутизації за правилами протоколу OSPF.

Відповідності IP-адрес вузлам та інтерфейсам показані в таблиці 3.4.

### Відповідності IP-адрес вузлам та інтерфейсам

Таблиця 3.4

Вузол	Альтернативні інтерфейси
A	A-B - 10.0.0.1 A-C - 20.0.0.1 A-D - 30.0.0.1
B	B-A - 10.0.0.2 B-E - 40.0.0.1 B-F - 50.0.0.1
C	C-A - 20.0.0.2

	C-F - 60.0.0.1 C-G - 70.0.0.1
D	D-A - 30.0.0.2 D-H - 80.0.0.1
E	E-B - 40.0.0.2 E-H - 90.0.0.1
F	F-B - 50.0.0.2 F-C - 60.0.0.2 F-G - 100.0.0.1
G	G-C - 70.0.0.2 G-F - 100.0.0.2
H	H-D - 80.0.0.2 H-E - 90.0.0.2

Маршрутну таблицю, що створюється та використовується в такому випадку, вважається основною. Вона показана як основна таблиця маршрутизації (Табл.3.5) (Main routing table). Враховуються також і створені додаткові маршрутні таблиці (Additional routing table) (Табл. 3.6-3.8) в запропонованому удосконаленні методу, що відповідають найкоротшим обхідним шляхам за умов виявлення та ігнорування перевантаженого мережного обладнання у комп'ютерній мережі. При отриманні даних про перевантаження деякого (обраного експериментально) вузлового обладнання пакет потрібно направляти шляхом, вибраним з додаткової таблиці, яка побудована з врахуванням інформації, що надходить від методу прогнозування.

#### **Основна таблиця маршрутизації (пошук шляху від вузла В до вузла D)**

*Таблиця 3.5*

Шлях (Path)	Адреса призначення (Destination Address)	Шлюз (Gateway)	Інтерфейс (Interface)	Метрика (Metric)
BA	10.0.0.0	10.0.0.1	10.0.0.2	2

BAC	20.0.0.0	10.0.0.1	10.0.0.1	4
BAD	30.0.0.0	10.0.0.1	10.0.0.1	4
BE	40.0.0.0	40.0.0.1	40.0.0.2	3
BF	50.0.0.0	50.0.0.1	50.0.0.2	2
BFG	100.0.0.0	50.0.0.1	50.0.0.2	4
BEH	90.0.0.0	40.0.0.1	40.0.0.2	5

**Додаткова маршрутна таблиця перевантаженого вузла С (Additional routing table for overloaded node C)**

Таблиця 3.6

Шлях (Path)	Адреса призначення (Destination Address)	Шлюз (Gateway)	Альтернативний Інтерфейс (Alternative interface)	Метрика (Metric)
BFCA	10.0.0.0	50.0.0.1	50.0.0.2	6
BFC	60.0.0.0	50.0.0.1	50.0.0.2	4
<b>BEHD</b>	<b>80.0.0.0</b>	<b>40.0.0.1</b>	<b>40.0.0.2</b>	<b>8</b>
BADHE	90.0.0.0	10.0.0.1	10.0.0.1	9
BACF	60.0.0.0	10.0.0.1	10.0.0.1	6
BFCG	80.0.0.0	50.0.0.1	50.0.0.2	7
BADH	80.0.0.0	10.0.0.1	10.0.0.1	7

**Додаткова маршрутна таблиця перевантаженого вузла Е (Additional routing table for overloaded node E)**

Таблиця 3.7

Шлях (Path)	Адреса призначення (Destination Address)	Шлюз (Gateway)	Альтернативний Інтерфейс (Alternative interface)	Метрика (Metric)
-------------	--	----------------	--	------------------

BFCA	10.0.0.0	50.0.0.1	50.0.0.2	6
BFC	20.0.0.0	50.0.0.1	50.0.0.2	4
<b>BECAD</b>	<b>30.0.0.0</b>	<b>40.0.0.1</b>	<b>40.0.0.2</b>	<b>8</b>
BADHE	40.0.0.0	10.0.0.1	10.0.0.1	9
BACF	50.0.0.0	10.0.0.1	10.0.0.1	6
BFCG	70.0.0.0	50.0.0.1	50.0.0.2	7
BADH	80.0.0.0	10.0.0.1	10.0.0.1	7

**Додаткова маршрутна таблиця для перевантаженого H (Additional routing table for overloaded node H)**

*Таблиця 3.8*

Шлях (Path)	Адреса призначення (Destination Address)	Шлюз (Gateway)	Альтернативний Інтерфейс (Alternative interface)	Метрика (Metric)
BFCA	10.0.0.0	50.0.0.1	50.0.0.2	6
BFC	20.0.0.0	50.0.0.1	50.0.0.2	4
<b>BFCAD</b>	<b>30.0.0.0</b>	<b>50.0.0.1</b>	<b>50.0.0.2</b>	<b>8</b>
BADHE	40.0.0.0	10.0.0.1	10.0.0.1	9
BACF	50.0.0.0	10.0.0.1	10.0.0.1	6
BFCG	70.0.0.0	50.0.0.1	50.0.0.2	7
BADH	80.0.0.0	10.0.0.1	10.0.0.1	7

Поля таблиць 3.4 – 3.8 мають такі значення: Адреса призначення (Destination Address) є адресою призначення пакету; Шлюз (Gateway) – це шлюз, через який дані відправляються поточним маршрутизатором; Інтерфейс (Interface) – це інтерфейс, через який пакет з даними виходить з поточного маршрутизатора; Метрика (Metric) є вартістю переходу до вузла призначення; Альтернативний інтерфейс (Alternative Interface) – це інтерфейс, через який пакет з даними виходить з поточного

маршрутизатора, поле буде заповненим лише при наявності таких альтернативного (альтернативних) шляху (шляхів) у додаткових таблицях.

Вибір шляхів для наведеного прикладу початково ґрунтується на даних, отриманих з The Opte Project, який містить в собі дані опису вузлів та маршрутів всесвітньої мережі Інтернет. Крім того, альтернативні шляхи будуються на основі прогнозованого перевантаження буферів обраного вузла. Першим ПЗ подає той альтернативний шлях, який є найкоротшим з можливих розрахованих, далі другий, і так далі, у порядку зростання ваги (метрики) розрахованих шляхів. Цей спосіб таким чином дає змогу оптимізувати інтенсивність завантаження будь-якого вузлового обладнання, яке досліджується та використовується в конкретний момент часу.

Основною перевагою удосконаленого методу маршрутизації мережного трафіку в трактах обміну даними є врахування розрахованих значень прогнозу тренду трафіку, отриманого за допомогою застосування розробленого методу короткострокового прогнозування інтенсивності трафіку та побудова альтернативних маршрутів передавання даних з використанням цієї інформації.

### **3.8 Тестування програмного забезпечення інформаційної технології**

На сьогодні вченими встановлено, що у роботі нинішніх комп'ютерних мереж існує ряд важливих проблем, які здійснюють свій вплив на завантаження мережного обладнання комп'ютерної мережі. Беручи до уваги теперішні вимоги до комп'ютерних мереж та телекомунікаційних мереж до передавання даних в різних галузях людської промисловості, можна відзначити те, що оскільки постійно зростаюча кількість користувачів спонукає збільшення інтенсивності трафіку, то це веде до втрати пакетів при передаванні інформації [80].

У цьому розділі було здійснено експериментальне вивчення та проаналізовано трафіку комп'ютерної мережі в реальному часі, базуючись на спостереженнях процесу проходження даних у комп'ютерній мережі. Інструментарієм для дослідження є розроблене програмне забезпечення для моніторингу мережі за наступними параметрами: сумарна кількість трафіку, розміщена на сервері,

пропускна здатність досліджуваного сегменту мережі. Даний розроблений аналіз трафіку використовується для прогнозування трафіку, що в свою чергу спричиняє запобігання втрати пакетів. Дане дослідження полягає у розробленні та вдосконаленні алгоритмічних методів для адаптивного управління пропускною спроможністю портів мережного обладнання комп'ютерних мереж, що дає змогу зменшити кількість втрачених пакетів у мережному обладнанні за умов наявності пульсуючого трафіку та знизити інтенсивність завантаженості мережного обладнання комп'ютерних мереж.

Розроблене ПЗ відноситься до області обміну даних у каналах комп'ютерних мереж, та призначений для виділення та короткотермінового прогнозування значень трафіку та параметрів, які отримуються на їх основі, в єдиному домені колізій в інформаційних комп'ютерних мережах для запобігання втрати пакетів з даними у мережному обладнанні. Розроблений аналізатор трафіку збирає трафік, аналізує отримані дані та формує такі наступні параметри: час моніторингу, кількість пакетів у отриманому файлі, кількість пакетів, отриманих за час моніторингу, розмір цих пакетів в байтах (чи інших одиницях), які виступають в ролі вихідних даних для короткострокового прогнозування.

Розроблене ПЗ дозволяє визначати і відобразжати отримані на обраному проміжку часу дані спостереження трафіку в комп'ютерній мережі. Проаналізовані зразки трафіку є вихідними даними для обчислення прогнозованих значень трафіку на основі розробленої математичної моделі, що описує коливний рух нелінійної системи (див. розділ 2).

Після завантаження розробленого ПЗ аналізатора трафіку автоматично з'являється діалог підключення аналізатора до обраної бази даних. Після встановлення зв'язку з базою даних виставляється часовий інтервал для здійснення необхідного дослідження на лічильниках з назвами «From» та «To» у найнижчій частині початкового вікна. Після натискання на кнопку «Show» в області відображення трафіку відобразяться необхідні показники та значення з обраного діапазону трафіку.

Для завантаження та відображення обчислених значень кореляції обраного

вдрізьку реальних значень трафіку відносно прогнозованих необхідно натиснути кнопку «Match». Якщо виникає потреба змінити параметри відображення значень трафіку та розрахованого прогнозу, на панелі налаштувань необхідно обрати та натиснути кнопку «Update», щоби відображені результати могли оновитись.

Під час пакетної обробки даних обчислення здійснюються автоматично на обраному часовому інтервалі з певним проміжком, згідно значень параметрів, попередньо заданих у панелі налаштувань. Результатом роботи програмного забезпечення є набір зображень, розміщених у файлах з назвами, показаними у форматі: <назва обраної Ateb-функції>\_<час>\_<дата>\_<префікс>.png

В області логування розміщуються результати обчислень. Для завантаження режиму пакетного оброблення даних трафіку потрібно натиснути на клавіатурі комбінацію клавіш Ctrl+B.

Дії користувача, що має намір дослідити зразок трафіку, виглядають наступним чином:

Спершу задається інтервал часу спостереження за трафіком, який може бути вибраний довільно. Розроблене програмне забезпечення дозволяє зберігати та здійснювати аналіз зразків трафіку. На обраному інтервалі трафіку відбувається пошук максимального та мінімального значення трафіку у відповідний момент часу на заданому проміжку. Далі знаходимо середнє значення (по осі ОУ, по осі ОХ заданий інтервал відображається на проміжок  $([-P(n,1); P(n,1)]$ , де  $P(n,1)$  – період обраної Ateb-функції) між максимальним та мінімальним, з метою порівняння зі значеннями обраної у параметрах програми Ateb-функцією. Середнє значення дорівнює нулю, а мінімальне та максимальне відповідно за -1 та 1, як межі для значень обраної Ateb-функції. Над усіма проміжними значеннями проводиться нормалізація за допомогою ділення на половину різниці між максимальним та мінімальним значеннями трафіку.

Далі відбувається обчислення різниць між збереженими значеннями трафіку та обчисленими значеннями Ateb-функції на вибраному інтервалі, з кроком 0.01, тобто у цьому випадку отримуємо  $2 \cdot P(n,1) \cdot 100$  обчислених значень. Наступним кроком відбувається пошук середнього значення відхилення ( $\mu$ ) у масиві обчислених



різниць.

Тоді за рівнянням

$$M = \frac{2 - \mu}{2} \quad (3.9)$$

здійснюється обчислення значення параметра ординати даної точки для побудови значень та для зображення обчисленого прогнозу на екрані на основі обраного типу Ateb-функцій для реальних значень трафіку.

Блок-схема роботи методу короткострокового прогнозування в комп'ютерній мережі у розробленому програмному забезпеченні представлена на рисунку 3.36.

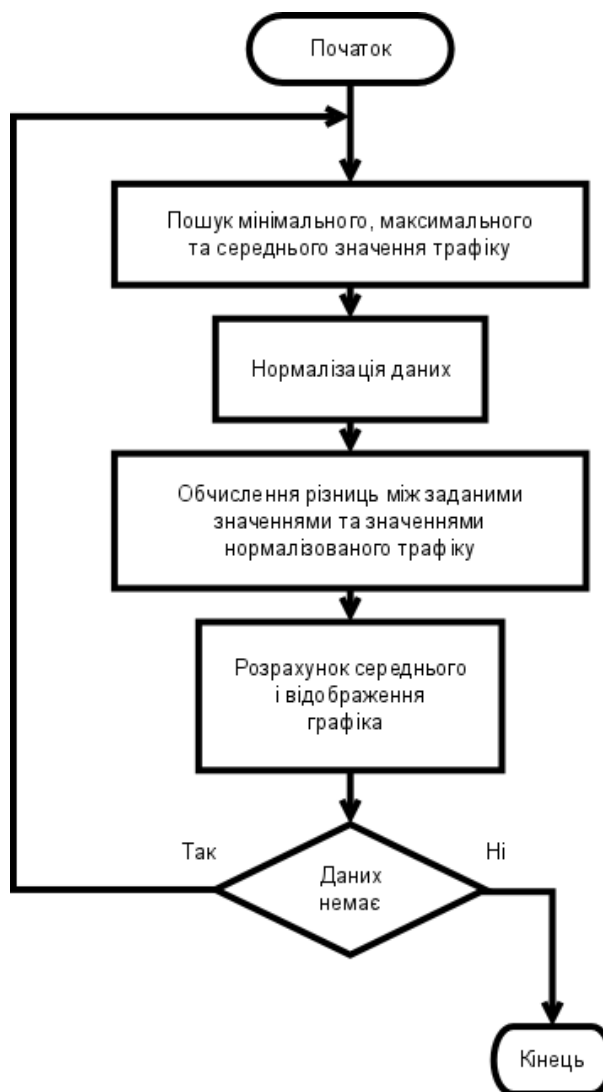


Рис.3.36 Блок-схема роботи методу прогнозування в комп'ютерній мережі у розробленому програмному забезпеченні

На рисунках 3.37-3.39 зображено роботу розробленого аналізатора трафіку та реалізований метод короткострокового прогнозування трафіку, та у розділі 4 показано, як

на цій основі здійснюється перерозподіл навантаження у комп'ютерній мережі за допомогою удосконаленого методу маршрутизації пакетів з даними.

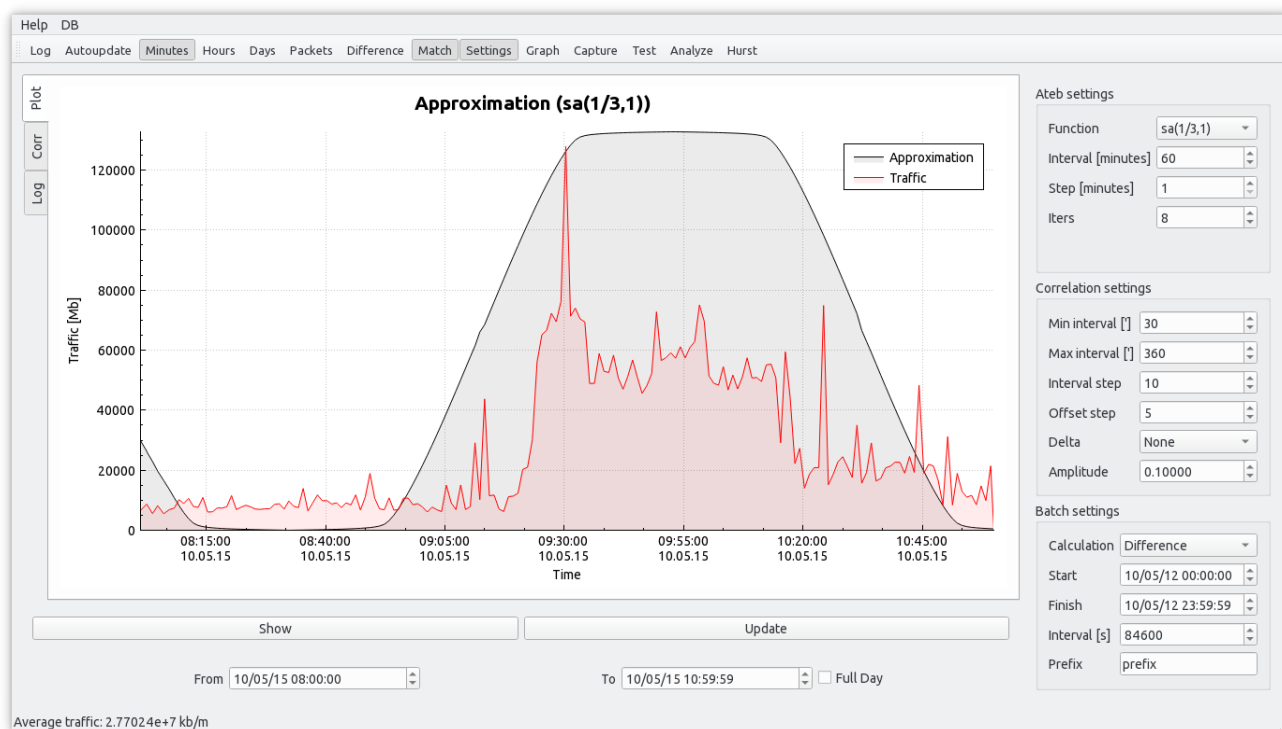


Рис. 3.37 Графік порівняння трафіку та значень прогнозу на основі обраної Ateb-функції з параметрами  $n=1/3$ ,  $m=1$ .

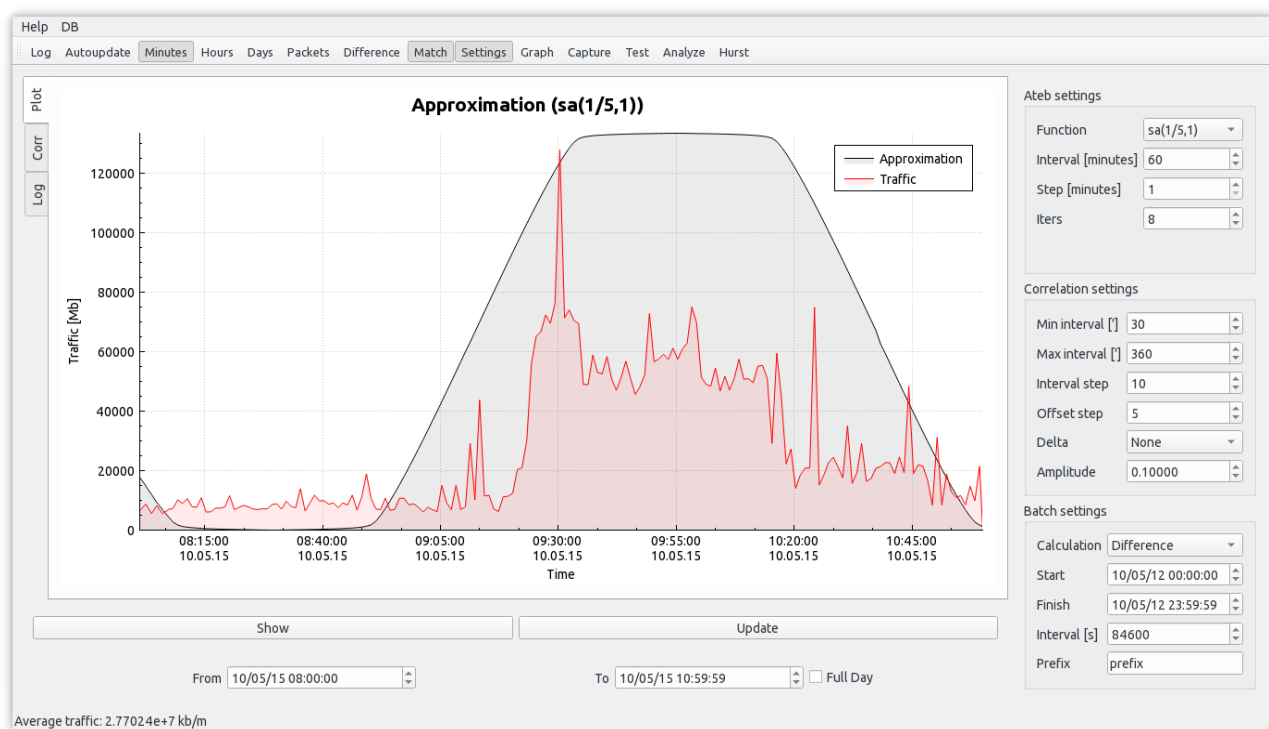


Рис. 3.38 Графік порівняння трафіку та значень прогнозу на основі обраної Ateb-функції з параметрами  $n=1/5$ ,  $m=1$ .

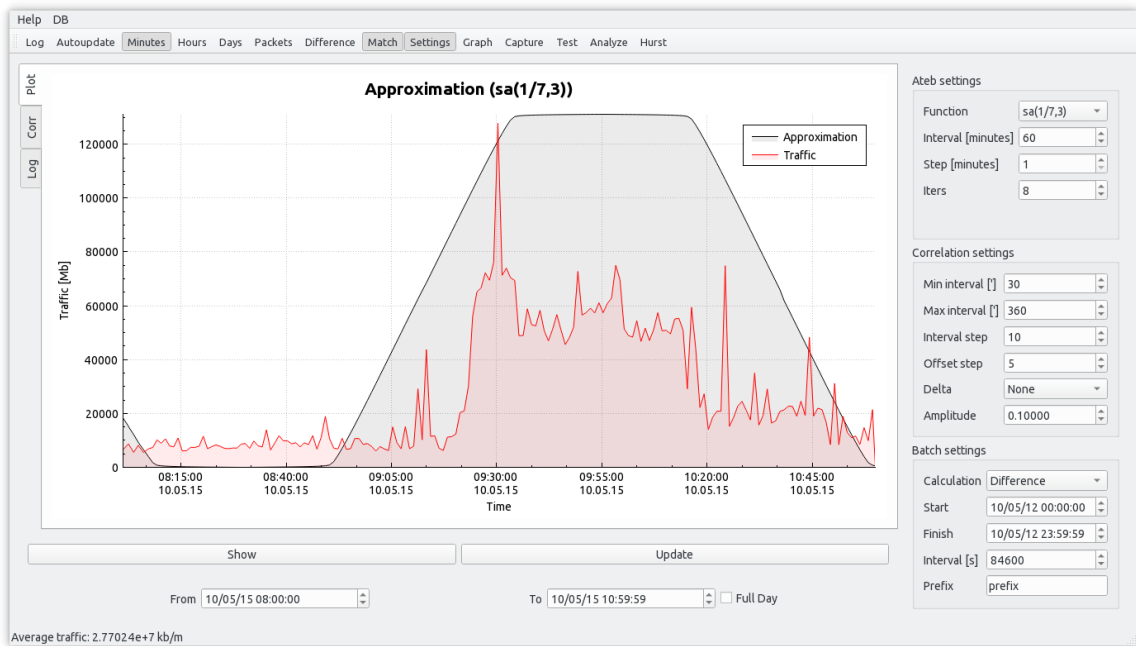


Рис.3.39 Графік порівняння трафіку та значень прогнозу на основі обраної Ateb-функції з параметрами  $n=1/7$ ,  $m=3$

З метою покращення значень та характеристик розробленого прогнозу, було додатково введено механізм додавання дельта-функцій. Для залучення дельта-функції до значень Ateb-функції потрібно скористатися опцією спадного меню Delta. Графік відобразиться автоматично. Результати роботи ПЗ представлені на рис. 3.40-3.47.

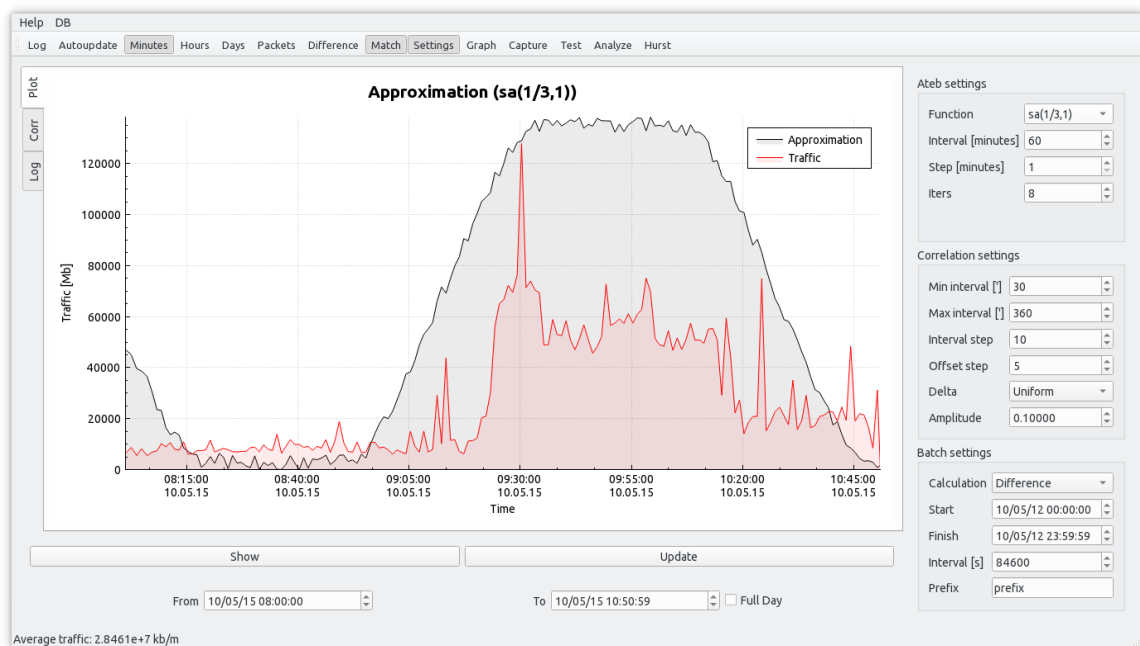


Рис.3.40 Графік після додавання рівномірного розподілу дельта-функції для обраної Ateb-функції з параметрами  $n=1/3$ ,  $m=1$ .

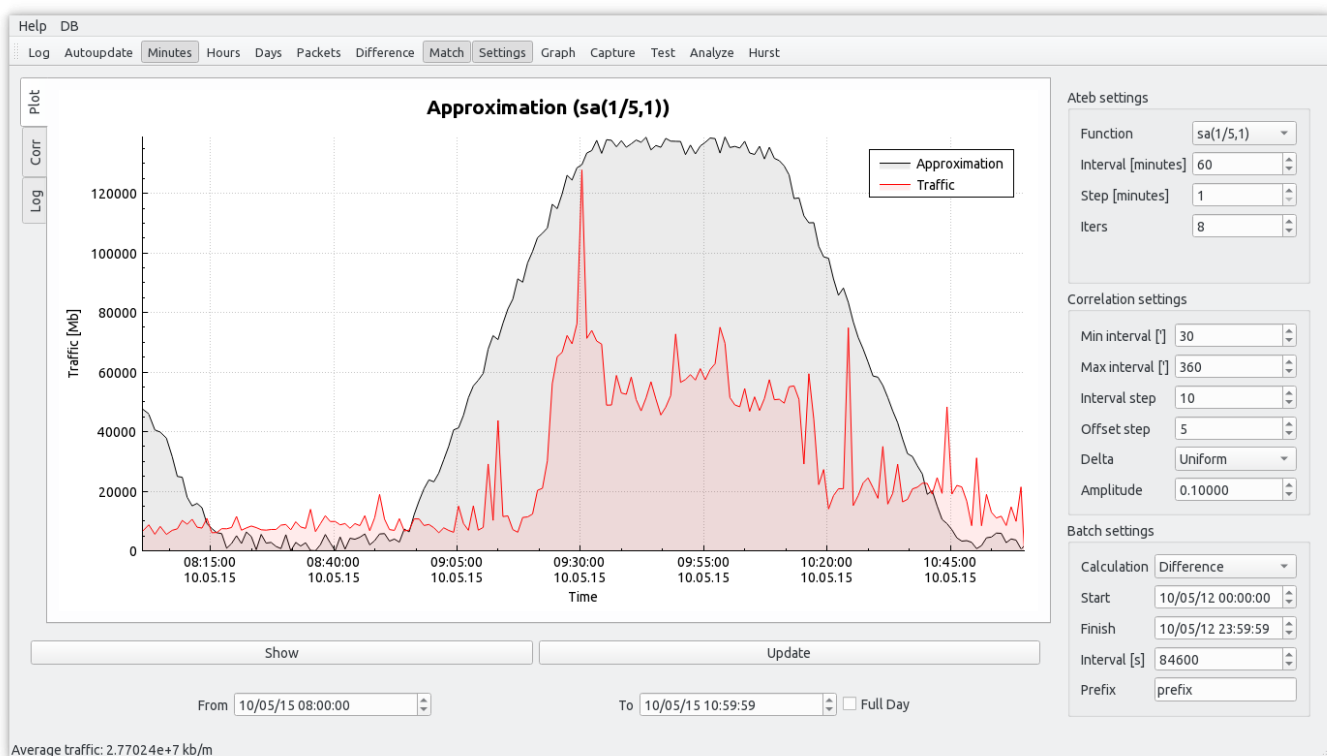


Рис.3.41 Графік після додавання рівномірного розподілу дельта функції для обраної Ateb-функції з параметрами  $n=1/5$ ,  $m=1$ .

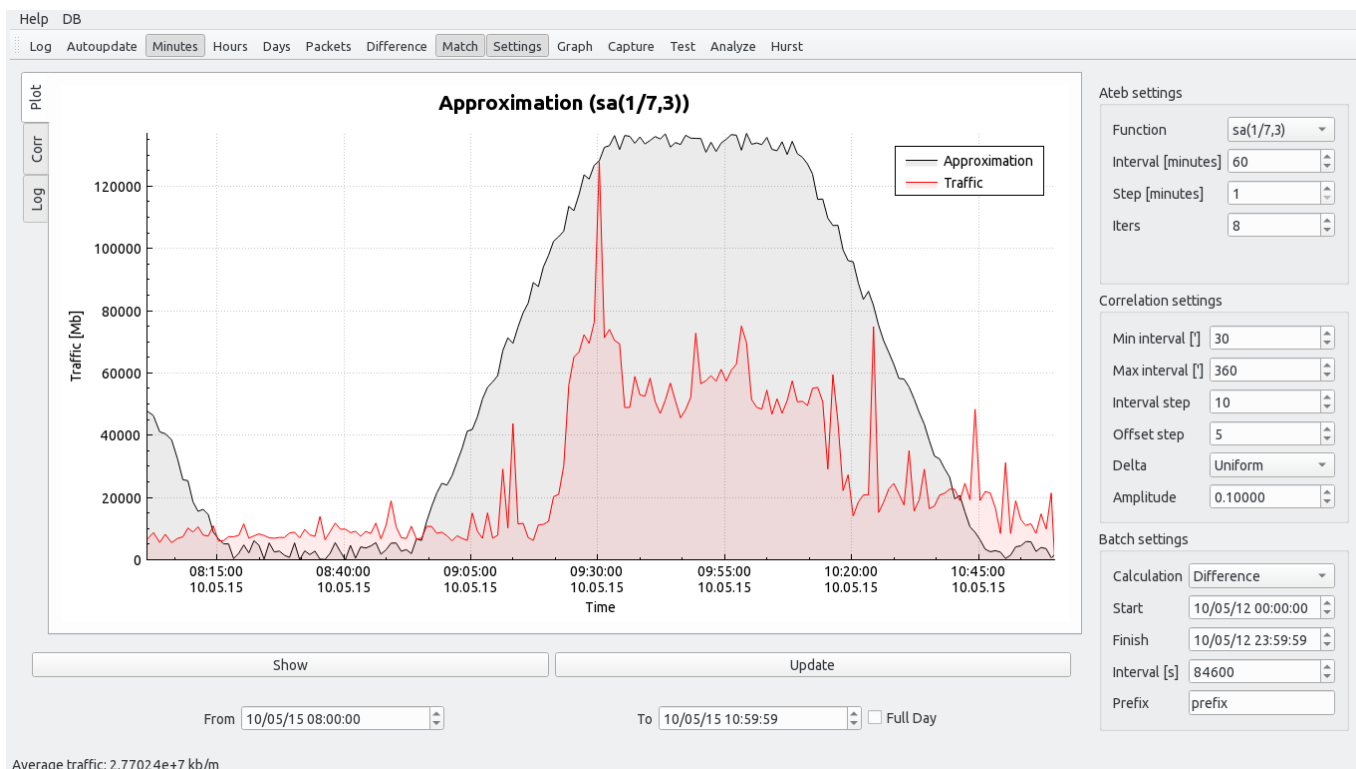


Рис.3.42 Графік після додавання рівномірного розподілу дельта функції для обраної Ateb-функції з параметрами  $n=1/7$ ,  $m=3$ .

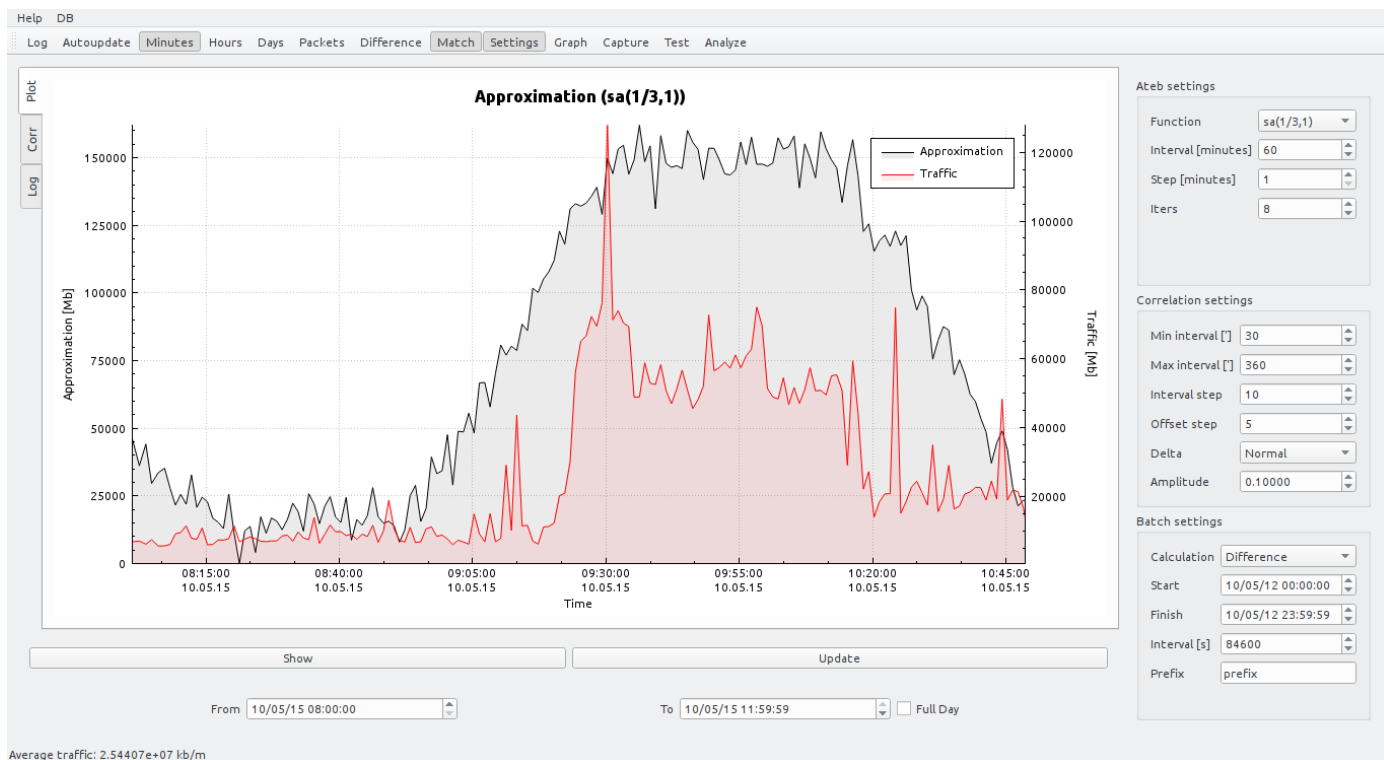


Рисунок 3.42 Графік після додавання нормального розподілу дельта функції для обраної Ateb-функції з параметрами  $n=1/3$ ,  $m=1$ .

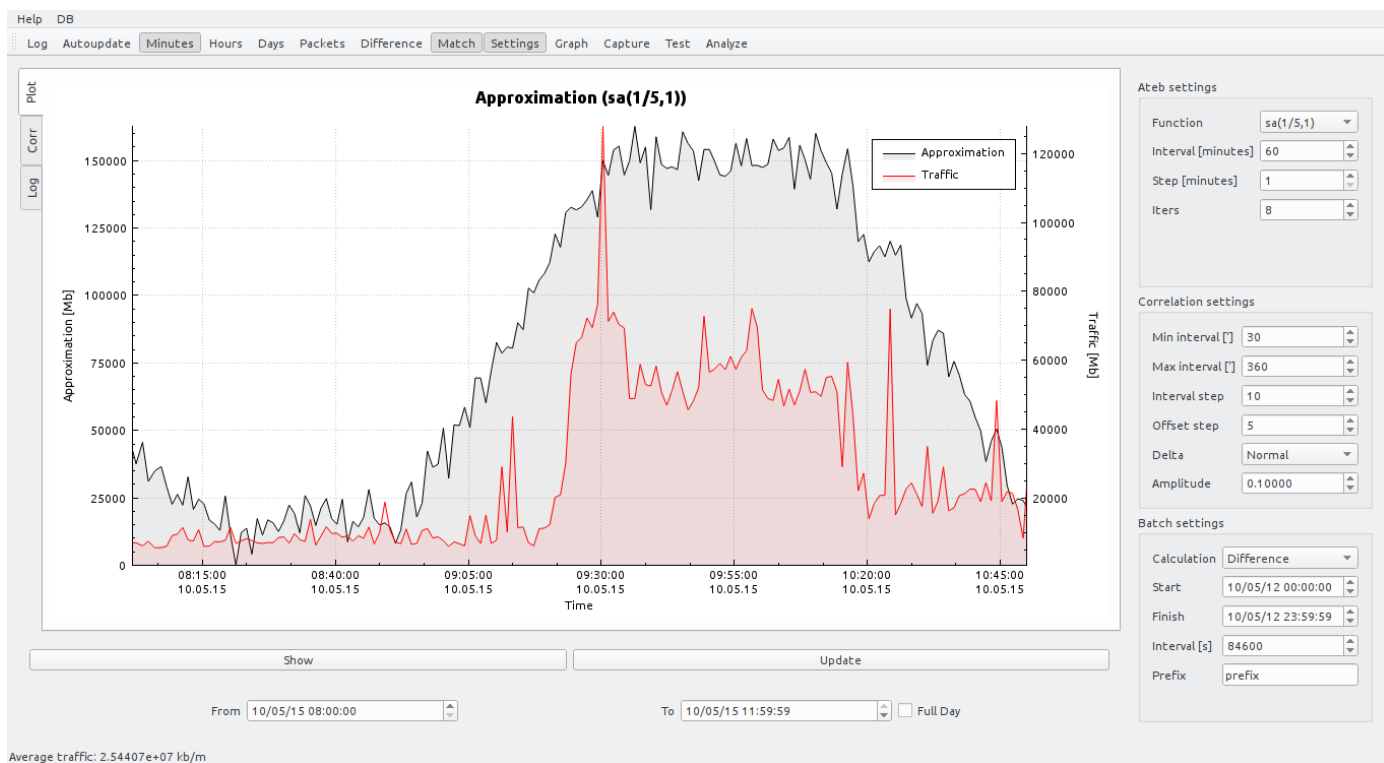


Рисунок 3.43 Графік після додавання нормального розподілу дельта функції для обраної Ateb-функції з параметрами  $n=1/5$ ,  $m=1$ .

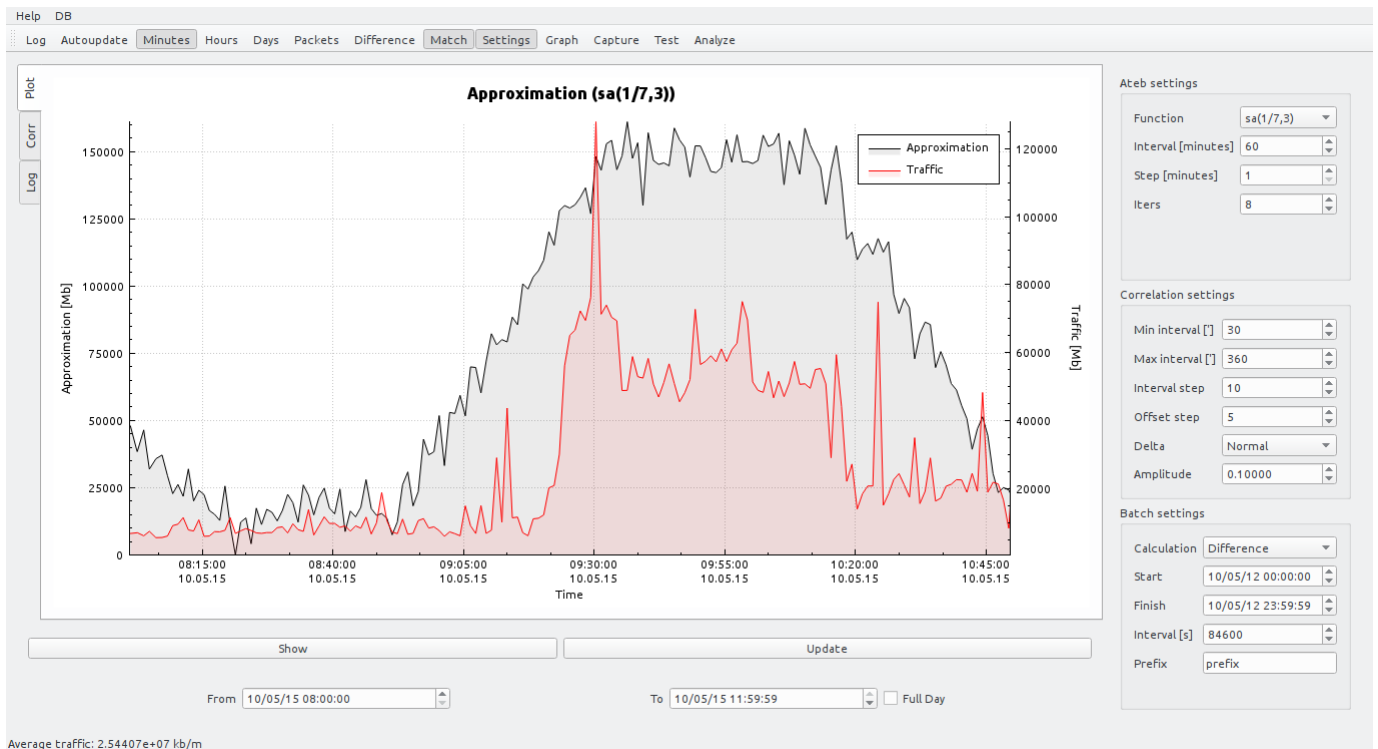


Рис.3.44 Графік після додавання нормального розподілу дельта функції для обраної Ateb-функції з параметрами  $n=1/7$ ,  $m=3$

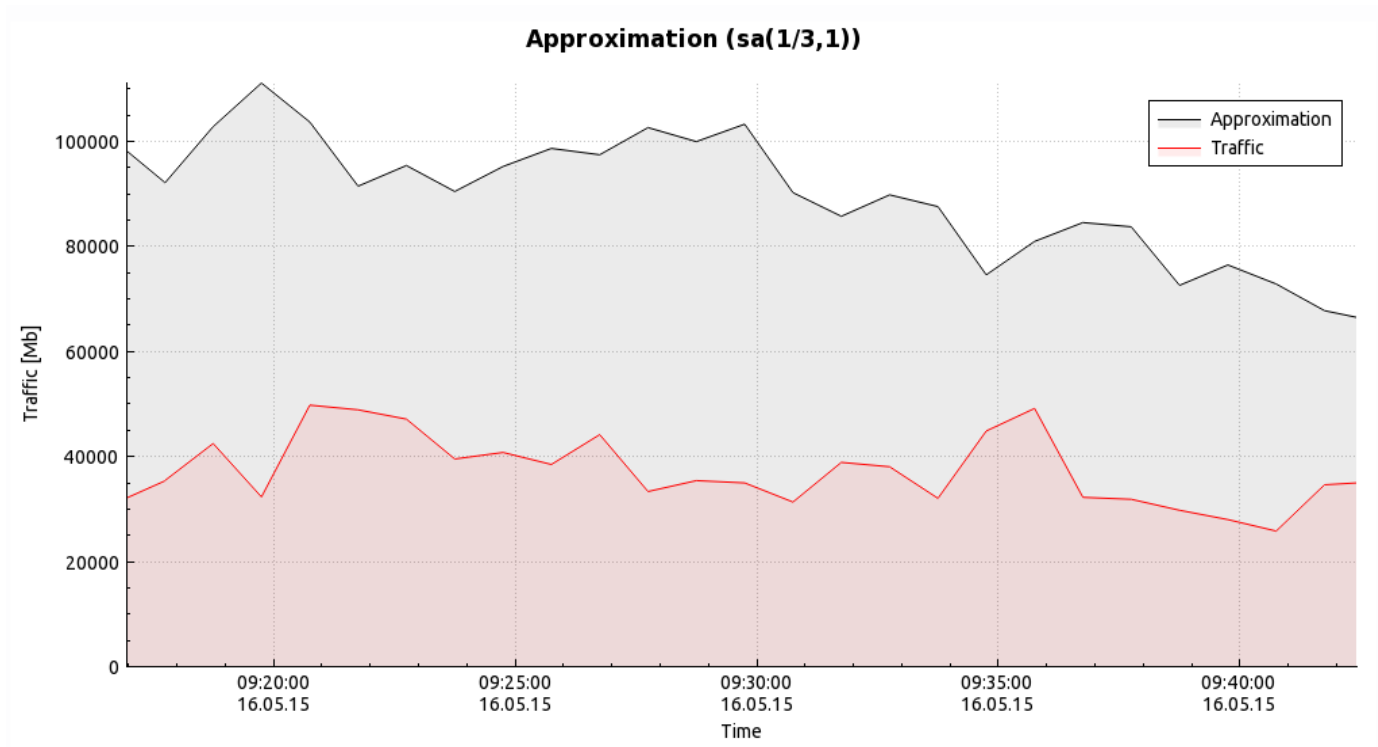


Рис.3.45 Графік порівняння зразка трафіку та промасштабованих значень прогнозу на основі обраної Ateb-функції за параметрами  $n=1/3$ ,  $m=1$  за застосуванням дельта-функції (у детальному вигляді)

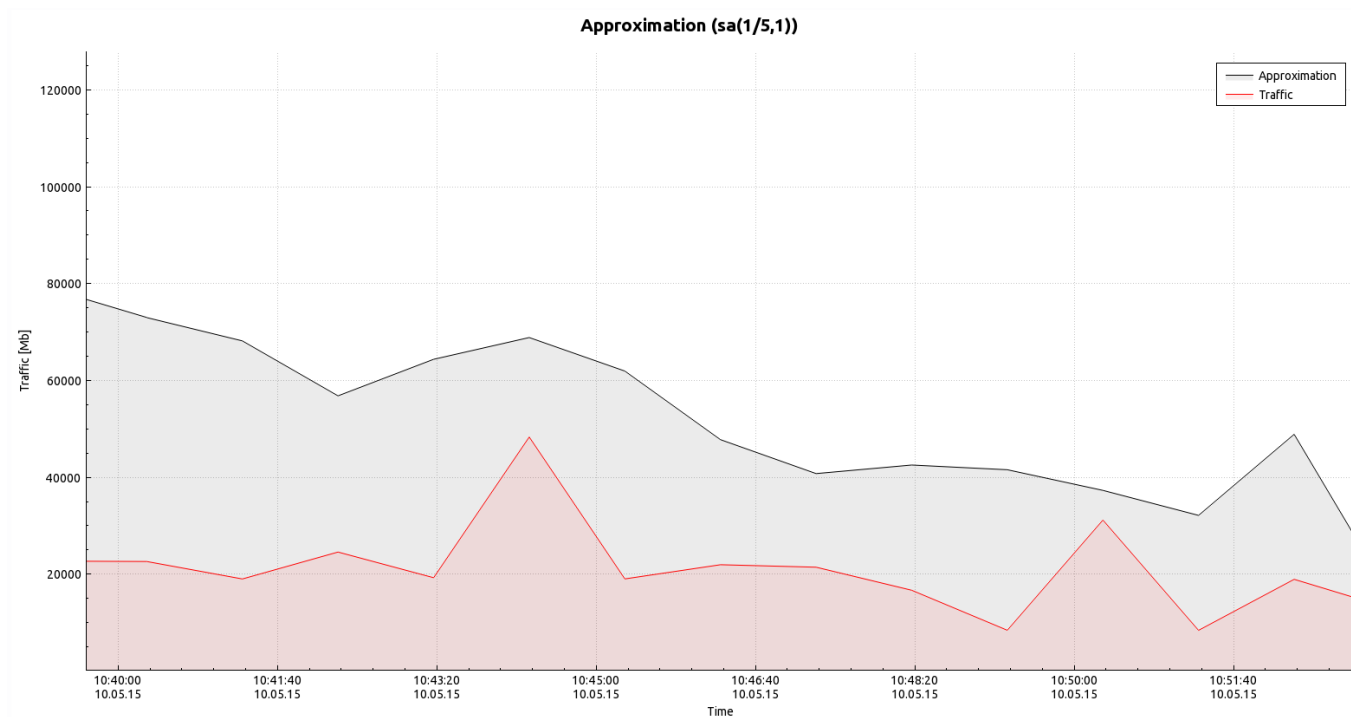


Рис.3.46 Графік порівняння зразка трафіку та промасштабованих значень прогнозу на основі обраної Ateb-функції за параметрами  $n=1/5$ ,  $m=1$  за застосуванням дельта-функції (у детальному вигляді)

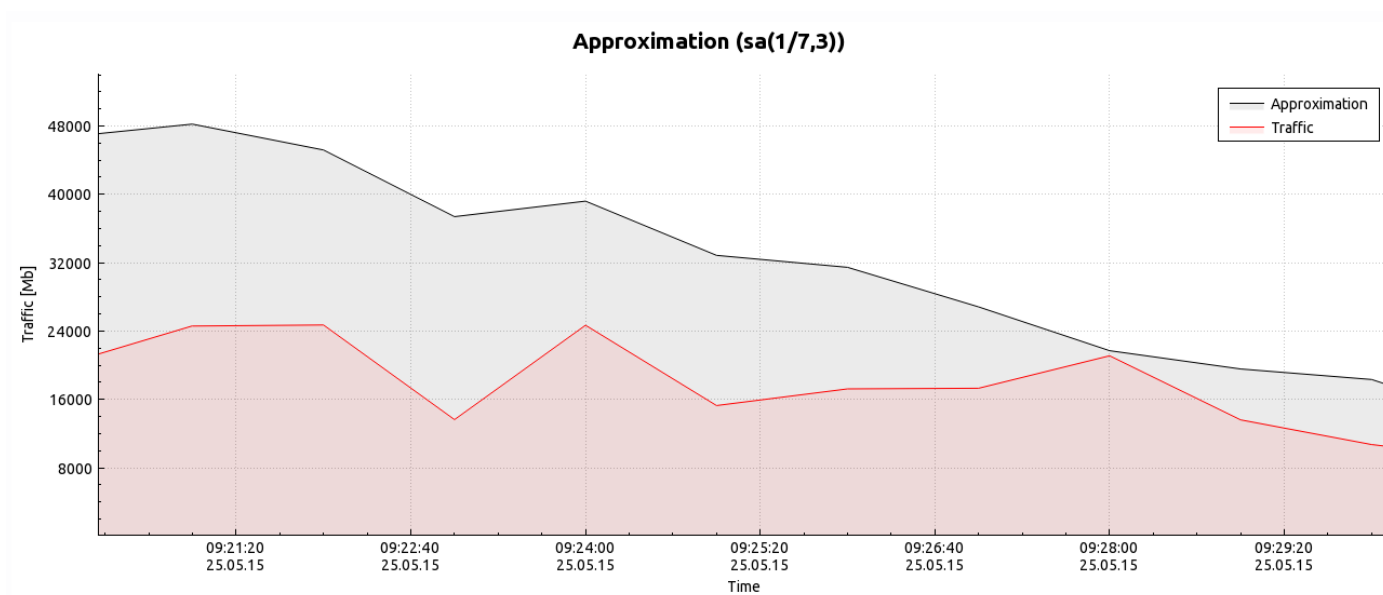


Рис.3.47 Графік порівняння зразка трафіку та промасштабованих значень прогнозу на основі обраної Ateb-функції за параметрами  $n=1/7$ ,  $m=3$  за застосуванням дельта-функції (у детальному вигляді)

У випадку дослідження подібностей зразків трафіку до безпосередніх значень обраних Ateb-функцій з встановленими параметрами, необхідно скористатись функціями спадного меню Difference. Результати роботи цього функціоналу ПЗ

показані на рис. 3.48-3.50.

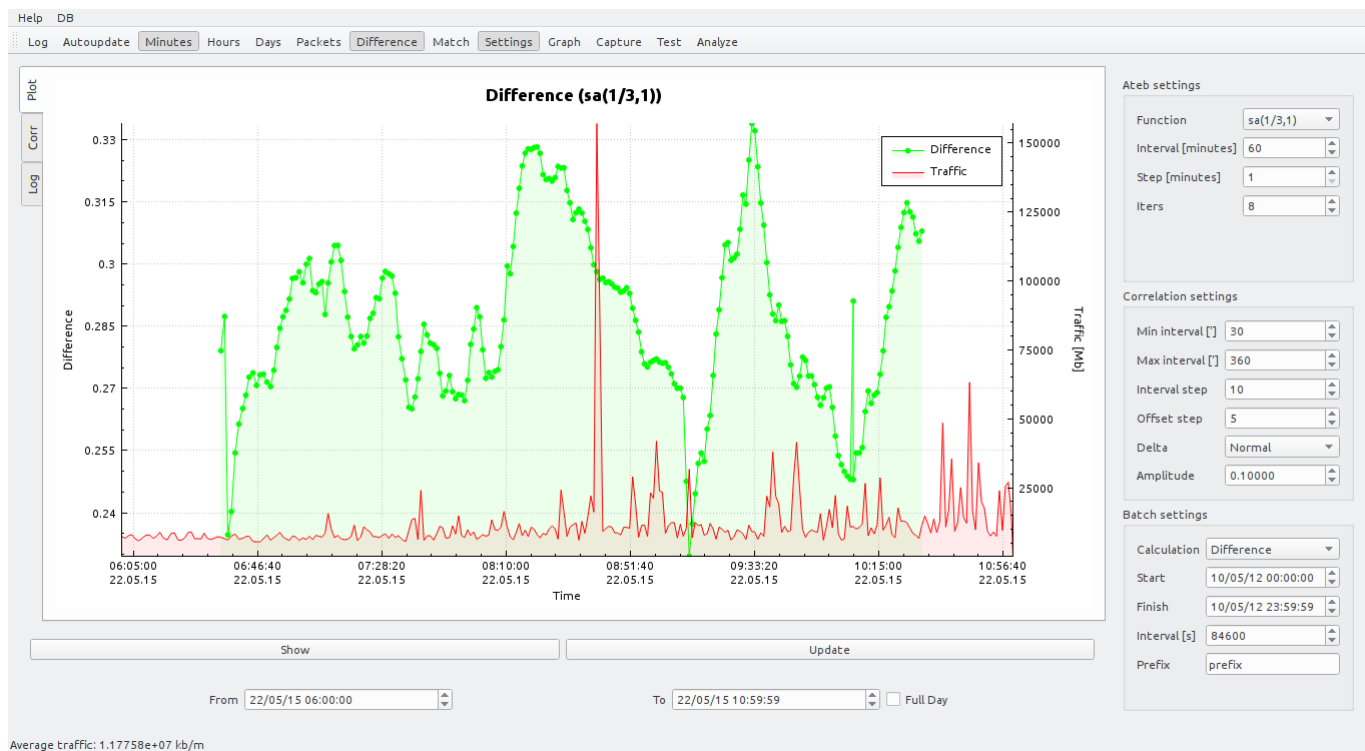


Рис.3.48 Моніторинг даних трафіку в комп'ютерній мережі  $n=1$ ,  $m=1/3$ .



Рис.3.49 Моніторинг даних трафіку комп'ютерній мережі  $n=1/5$ ,  $m=1$ .



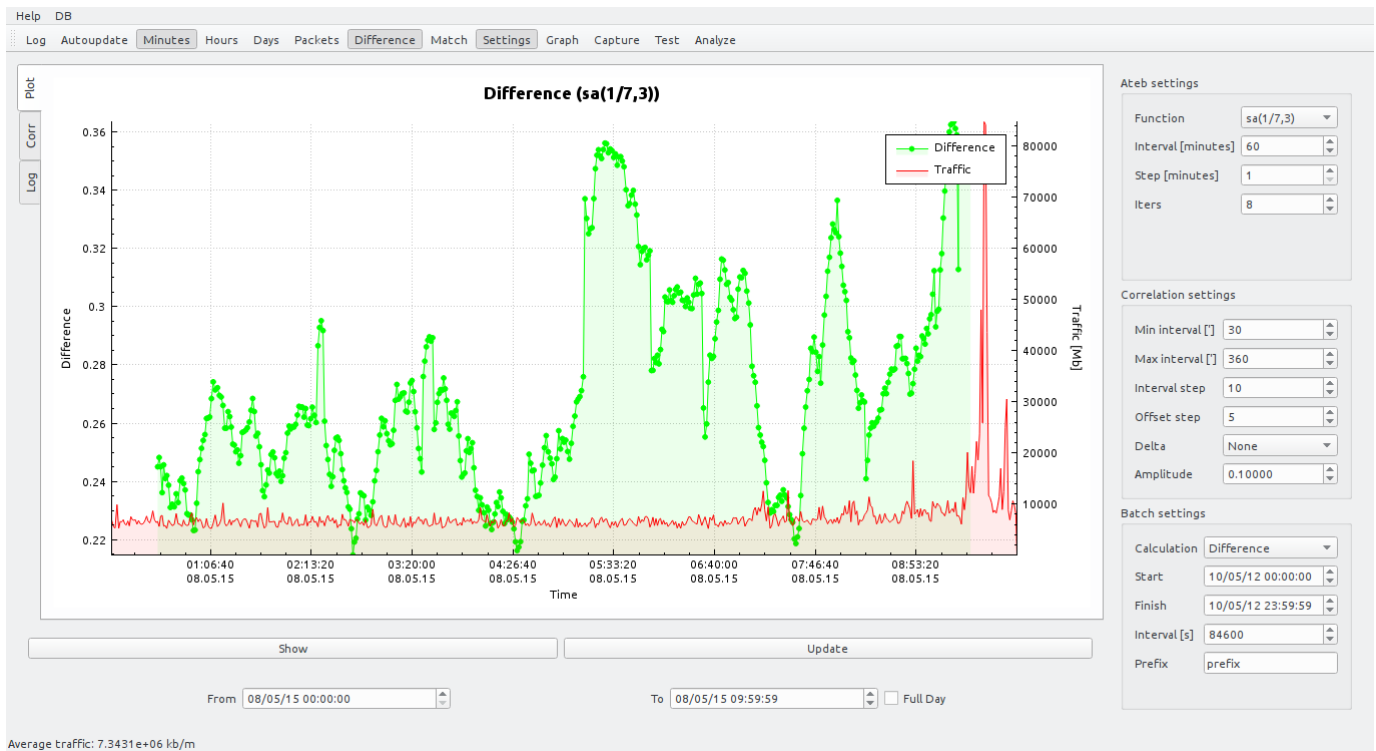


Рис.3.50 Моніторинг даних трафіку комп'ютерної мережі  $n=1/7$ ,  $m=3$ .

Для ефективного моніторингу мережі розроблено аналізатор трафіку, однією з складових якого є програмне забезпечення для аналізу роботи комп'ютерної мережі. Призначення ПЗ полягає у забезпеченні автоматизованого збору інформації з мережевих пристроїв та реалізації прогнозування значень зразків трафіку [25]. В результаті роботи програмного забезпечення параметри трафіку візуально відображаються на графіках та даються відповідні рекомендації про перерозподіл навантаження у мережі.

На основі теорії Ateb-функцій та даних моніторингу трафіку комп'ютерної мережі реалізовано прогнозування трафіку комп'ютерної мережі. На рисунках 3.37-3.50 представлено результати моніторингу трафіку у вузловому обладнанні. Перевагою запропонованого методу є використання однієї аналітичної формули для обчислення прогнозу поведінки трафіку та реалізація перерозподілу інтенсивності навантаження вузлового обладнання у мережі. Ефективність запропонованого методу підтверджена експериментальними дослідженнями з використанням моніторингу мережі розробленим ПЗ.

Подано опис The Opte Project, дані з якого є джерелом для проведення тестування розроблених та удосконалених методів.

Крім того, було удосконалено метод маршрутизації трафіку, який розраховує нові альтернативні маршрути на основі розробленого методу короткострокового прогнозування значень трафіку.

### 3.8.1. Тестування розробленого програмного забезпечення на зібраних зразках трафіку

Тестування ПЗ відбувалось на кафедрі автоматизованих систем управління Національного університету «Львівська політехніка» та в Інституті теоретичної та прикладної інформатики Польської Академії наук (м.Глівіце).

Вибір вихідних даних відповідає значенням параметрів з таблиці 3.9. На цих рисунках червоний графік відповідає реальним значенням трафіку, а чорний графік є розрахунковими значеннями прогнозованого трафіку. Спостереження проводилося протягом 24 годин, з 1 по 30 травня 2015 року в комп'ютерній мережі в Інституті теоретичної та прикладної інформатики Польської Академії наук, але показано спостереження тільки протягом 3 днів на рис. 3.51-3.53 (інші візуалізації зразків трафіку знаходяться в Дод. 1).

Також описане ПЗ було протестовано не тільки на зразках трафіку комп'ютерної мережі кафедри АСУ, але і на зразках трафіку в ITAI PAS [108], які були отримані як з використанням аналізатора мережевих протоколів Wireshark, так і з використанням розробленого аналізатора трафіку з метою забезпечення достовірності результатів.

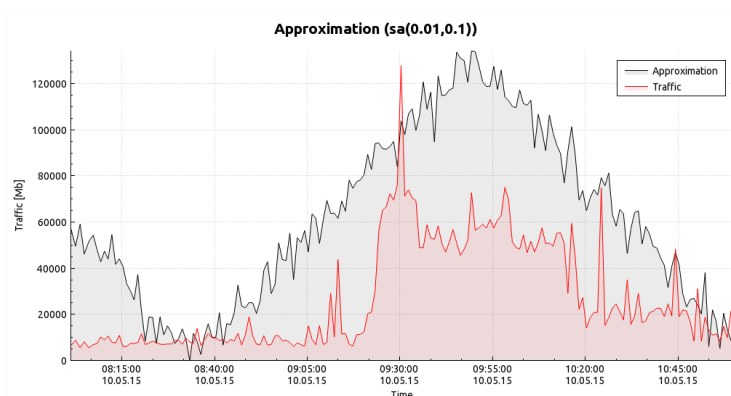


Рис.3.51 Моніторинг даних трафіку Інституту теоретичної та прикладної інформатики Польської Академії наук за 10.05.15р.

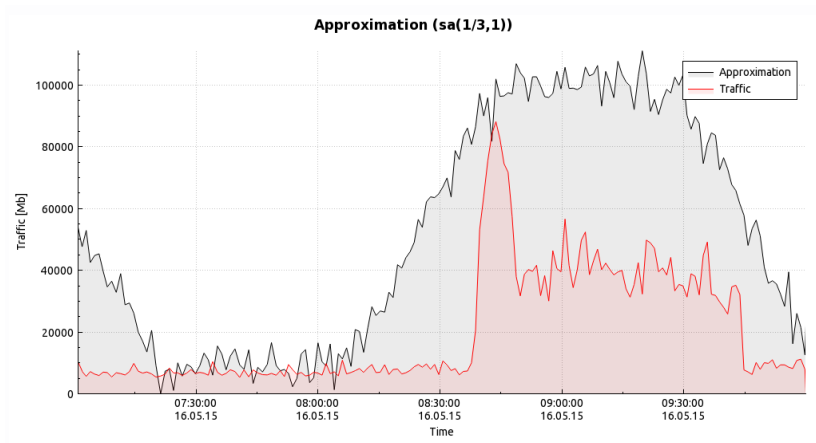


Рис.3.52 Моніторинг даних трафіку комп'ютерної мережі Інституту теоретичної та прикладної інформатики Польської Академії наук за 16.05.15р.

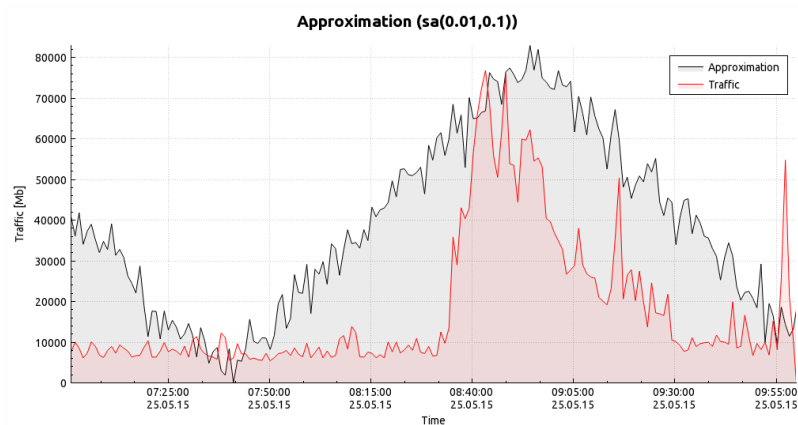


Рис.3.53 Моніторинг даних трафіку комп'ютерної мережі Інституту теоретичної та прикладної інформатики Польської Академії наук за 25.05.15р.

Для обчислення результатів експерименту було обрано наступні рівняння, що описують максимальну кореляцію та коефіцієнт, який показує відношення стандартної девіації до максимальної.

### Опис параметрів функцій для здійснення прогнозування трафіку в комп'ютерній мережі.

Таблиця 3.9.

№	Функція	Інтервал (хв.)	Крок прогнозування (хв.)	Час моніторингу (год.)
1.	Sa(1/3,1)	60	1	6

Максимальна кореляція  $\rho$ :

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^m (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^m (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^m (y_i - \bar{y})^2}} = \frac{\text{cov}(x,y)}{\sqrt{s_x^2 s_y^2}}, \rho = \max r_{xy}, \text{де } r_{xy} \in A \quad (3.10)$$

Коефіцієнт  $K$  відношення стандартної девіації до максимального:

$$s = \sqrt{\frac{n}{n-1} \sigma^2} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (3.11)$$

Порівняння результатів моделювання експериментів проводилось за критерієм максимальної кореляції  $\rho$ , а також було обчислено коефіцієнт  $k$  відношення стандартної девіації до максимальної. Обчислені результати порівняння подані у таблиці 3.10.

**Порівняння результатів моделювання трафіку з реальними даними трафіку мережі кафедри Інституту теоретичної та прикладної інформатики Польської Академії наук за 1 добу.**

*Таблиця 3.10.*

Дата	10.05.15	16.05.15	25.05.15
$K$	92,0%	91,9%	91,1%
$\rho$	0,80	0,78	0,73

Отримані результати показують, що порівняння реального та прогнозованого трафіку (на проміжку часу однієї доби) показує високий рівень подібності (з 91,1% до 94,8%), а значення кореляції в діапазоні 0,73 до 0,8 це підтверджує. Звідси випливає, що метод аналізу та прогнозування трафіку в комп'ютерній мережі на основі диференціальних рівнянь коливного руху та створене ПЗ для аналізу та прогнозування трафіку в комп'ютерній мережі, є достатньо ефективним та ПЗ продемонструвало позитивні результати роботи у вузловому обладнанні (а саме буферах) комп'ютерної мережі. Підсумовуючи все вищесказане, за рахунок таких нових дій можна буде ефективно знизити інтенсивність завантаження вузлового обладнання та покращити роботу комп'ютерної мережі в цілому.

### Висновки до розділу 3

1. Розроблено та реалізовано алгоритмічний метод, призначений для імітаційного моделювання збурень в нелінійних коливних системах. Здійснено моделювання поведінки системи при незбурених коливаннях, та процеси у нелінійних коливних системах з малим збуренням. Проведено аналіз розв'язків диференціальних рівнянь на основі Атеб-функцій та їхньої застосовності для моделювання трафіку в комп'ютерній мережі.
2. Розроблено метод короткострокового прогнозування інтенсивності трафіку, який на основі використання концепції добової ритміки забезпечує обґрунтування методу статистичного опрацювання значень трафіку в комп'ютерній мережі. Показано, що найбільшу користь при використанні розробленої моделі трафіку в комп'ютерній мережі, а саме орієнтовно до 12% (див. табл. 3.1) можна отримати у випадку дослідження та прогнозування найбільш нелінійних ділянок трафіку в порівнянні з існуючим, при цьому зберігаючи відповідність (у межах норми) з реальним трафіком та іншими попередньо дослідженими моделями трафіку.
3. Розроблено аналізатор трафіку комп'ютерної мережі, призначенням якого є збір зразків трафіку, з подальшою можливістю прогнозування даних трафіку за допомогою математичного механізму Атеб-функцій. В результаті роботи розробленого ПЗ параметри та значення трафіку візуально відображаються на графіках та розробляються відповідні рекомендації про перерозподіл завантаження вузлового обладнання у комп'ютерній мережі в режимі реального часу.
4. Розглянуто чотири основні реалізації алгоритму Дейкстри. Враховуючи всі особливості цих методів, для вирішення поставлених в дисертаційній роботі завдань за основу було вибрано класичний алгоритм Дейкстри, оскільки він підходить для переважної більшості випадків маршрутизації пакетів даних, є відносно простим у реалізації та дає найвищу швидкодію роботи ПЗ при його використанні. На цій основі був удосконалений метод

маршрутизації трафіку, що працює на основі даних, отриманих після здійснення прогнозування трафіку комп'ютерної мережі програмним шляхом та реалізує пошук та відображення маршрутів (в тому числі й альтернативних маршрутів при умовах наявності перевантажених вузлів) між реальними вузлами комп'ютерної мережі, дані про які були отримані з бази даних проекту The Opte Project.

5. Роботу розробленого аналізатора трафіку даних було протестовано на зразках трафіку, отриманих у комп'ютерній мережі кафедри автоматизованих систем управління НУ «ЛП», а також на зразках трафіку, зібраних у комп'ютерній мережі ITAI PAS, які були отримані за допомогою програмного забезпечення Wireshark та з використанням відповідного функціоналу розробленого ПЗ для забезпечення підтвердження достовірності результатів досліджень. У результаті роботи було отримано значення, що показали порівняння реальних та прогнозованих значень трафіку демонструє високий рівень подібності даних зразків, орієнтовно у діапазоні від 91,2% до 94,7%, а значення кореляції це підтверджують в діапазоні від 0,7 до 0,8 (див. табл. 3.10).

## РОЗДІЛ 4

### РОЗРОБЛЕННЯ МЕТОДІВ І ЗАСОБІВ АДАПТИВНОГО УПРАВЛІННЯ ІНТЕНСИВНІСТЮ ЗАВАНТАЖЕННЯ БУФЕРІВ ВУЗЛОВОГО ОБЛАДНАННЯ КОМП'ЮТЕРНОЇ МЕРЕЖІ

У четвертому розділі здійснено розроблення моделі пристрою адаптивного управління трафіком комп'ютерної мережі, експериментальні збір та дослідження зразків трафіку для проведення експериментів з розробленими методами інформаційної технології. Були проведені та описані експерименти для тестування зібраних зразків трафіку, зокрема порівняння методу прогнозування трафіку з методом прогнозування за допомогою похідних, а також здійснено імітаційне моделювання комп'ютерних мереж для вивчення впливу розроблених методів на параметри комп'ютерних мереж.

#### **4.1. Розроблення моделі пристрою адаптивного управління трафіком комп'ютерної мережі для ефективного впровадження інформаційної технології**

З метою ефективного впровадження та тестування розробленої інформаційної технології аналізу та прогнозування трафіку в комп'ютерних мережах, було розроблено модель пристрою адаптивного управління трафіком в комп'ютерних мережах.

Ця модель відноситься до телекомунікаційної техніки, до систем управління вузловим обладнанням комп'ютерної мережі, і призначена для визначення, прогнозування та адаптивного управління зміною параметрів трафіку у єдиному домені колізій в інформаційно-обчислювальних мережах з метою ефективного використання вузлового обладнання комп'ютерної мережі. Можливі сфери застосування пристрою адаптивного управління трафіком з використанням аналізу та прогнозування трафіку в комп'ютерній мережі – це системи управління мережного обладнанням комп'ютерної мережі.

Спостереження за трафіком здійснюється в єдиному домені колізій. Для забезпечення коректного прогнозування змін параметрів трафіку використовується розроблений метод короткострокового прогнозування інтенсивності трафіку, в основі якого лежить використання диференціальних рівнянь коливного руху. На основі обчислених даних реалізується адаптивне управління, яке полягає у перерозподілі завантаженості комутаційного пристрою.

Найбільш близьким до розробленого пристрою є патент на корисну модель «Вузол керування комутаційним пристроєм» [44, 46, 52]. У прототипі побудова засобів прогнозування пакетного трафіку виконувалась на основі теорії прогнозування часових рядів та використання апостеріорної інформації до вимірних значень параметрів потоків трафіку на входних портах пакетного комутатора, що зменшує кількість помилок у командних рішеннях. Використання цього методу забезпечує значення коефіцієнта пропускної здатності комутуючого обладнання у діапазоні 0,65 – 0,75.

Незважаючи на це, цей вузол управління не може забезпечити достатню ефективність використання комутаційного пристрою, тому що в ньому неефективно реалізований перерозподіл навантаження в умовах певного сегменту комп'ютерної мережі. Також цей вузол не спроможний забезпечити покращення у формуванні рішень адаптивного управління, що обумовлено особливістю побудови його блоку прогнозування значень параметрів трафіку.

В основу розроблення цієї моделі поставлена задача підвищення ефективності використання вузлового обладнання шляхом удосконалення перерозподілу інтенсивності навантаження, зокрема, додатковим укомплектуванням цього вузла пристроєм адаптивного управління значенням трафіку в комп'ютерній мережі з блоком прогнозування значень параметрів зразка трафіку, запрограмованим на використання інформації щодо зібраних та оброблених значень параметрів трафіку на входних портах вузлового обладнання, що створює умови для прогнозування значень таких параметрів та для формування рішень адаптивного управління, і цим самим підвищує інтенсивність завантаження буферів вузлового обладнання [51].



Поставлене завдання вирішується за допомогою того, що у пристрої адаптивного управління (який розміщується всередині комутаційного пристрою), який в свою чергу складається з послідовно з'єднаних пристрою збору даних, блоку адаптивного управління, а також пристрою виводу покращених параметрів управління, згідно розробленої моделі трафіку, між пристроєм збору даних та блоком адаптивного управління введений блок для здійснення прогнозування значень параметрів трафіку.

Розроблене вдосконалення націлене на визначення, прогнозування та адаптивне управління значеннями трафіку для перерозподілу завантаженості вузлового обладнання з метою підвищення використання завантаженості буферів в комп'ютерній мережі.

Уведений до складу пристрою адаптивного управління блок прогнозування параметрів трафіку працює за алгоритмічним методом, який вибирається згідно з конкретними технічними умовами його застосування. Він здійснює функцію захоплення та вимірювання значень параметрів трафіку, формування множин даних у певних часових проміжках для здійснення прогнозування, а також прогнозування значень зразків параметрів трафіку під час прийняття рішень адаптивного управління на вихід пристрою виводу покращених параметрів управління.

Пристрій адаптивного управління трафіком в комп'ютерній мережі на основі значень параметрів трафіку потоків пакетів, що були отримані на обраних інтервалах часу до моменту створення команд для адаптивного управління, дозволяє підвищити коефіцієнт завантаженості буферів вузлового обладнання при заданих межах втрат пакетів з даними [51].

Схематичну архітектуру запропонованого пристрою адаптивного управління трафіком в комп'ютерній мережі показує блок-схема, яка показана на рисунку 4.1.

На рисунку 4.1 зображений пристрій адаптивного управління трафіком в комп'ютерній мережі 1, який складається з послідовно поєднаних між собою пристрою збору даних 2 для захоплення поточних значень параметрів трафіку (на вхідних портах обладнання), блоку адаптивного управління 4, а також пристрою виводу покращених параметрів управління 5.

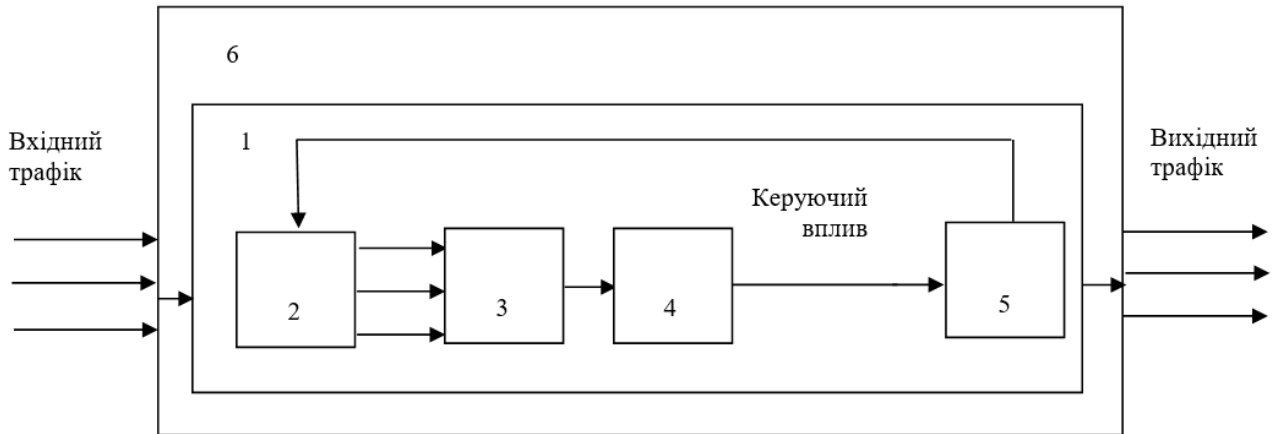


Рис. 4.1 Схеми пристрою адаптивного управління трафіком в комп'ютерній мережі

Між пристроєм збору даних та блоком адаптивного управління доданий блок прогнозування параметрів трафіку 3.

На рис. 4.1 також зображено пристрій адаптивного управління трафіком в комп'ютерній мережі 1, який розміщений всередині вузлового обладнання 6.

Пристрій адаптивного управління трафіком в комп'ютерній мережі працює так:

Потоки вхідного трафіку, які на рис. 4.1 зображені стрілками, потрапляють на вхідні порти вузлового обладнання 6. Далі вони надходять до пристрою адаптивного управління 1, який містить в собі пристрій збору даних 2, та проходять через нього, отримавши попередню обробку. Блок 2 послідовно, у реальному часі, маючи попередньо заданий часовий проміжок тік-інтервалу здійснює замір поточних значень параметрів трафіку, а результати здійснених вимірювань та обчислень надсилає відповідно на вхід блоку прогнозування параметрів трафіку 3. Наступним кроком блок прогнозування параметрів трафіку 3 послідовно приймає від пристрою збору даних 2 виміряні та збережені значення параметрів трафіку, здійснює їхнє оброблення таким чином, щоб створити послідовності вибірок даних, що відповідають встановленим вимогам методу прогнозування, і безпосередньо реалізує алгоритм короткострокового прогнозування [51]. Результати прогнозування надходять у блок адаптивного управління 4, який виробляє потоки керуючих впливів у вигляді певних відповідних команд управління, які подаються на вхід пристрою виводу скоригованих параметрів управління 5 вузлового обладнання 6.

Засновуючись на цій інформації, виконавчі механізми блоку 5 відповідно до отриманих команд від блоку 4 здійснюють відповідні зміни параметрів вихідних портів вузлового обладнання 6, а також паралельно з цим на кожному етапі вимірювань від пристрою виводу покращених параметрів управління 5, на наступний вхід блоку пристрою збору даних 2 надсилається інформація щодо тимчасових значень обраних параметрів для кожного із вхідних портів вузлового обладнання 6. Алгоритм адаптивного управління трафіком вибирається, виходячи із конкретних технічних умов використання вузлового обладнання. При будь-яких обставинах швидкодія реагування вузлового обладнання узгоджується з параметрами пульсацій трафіку. Розроблений пристрій адаптивного управління трафіком комп'ютерної мережі з програмним забезпеченням аналізує зібрані дані, записує у базу даних, формує наступні параметри: кількість пакетів, час моніторингу, кількість пакетів за час спостереження, розмір пакетів в байтах, які служать вихідними даними для прогнозування та адаптивного управління [51].

#### **4.2. Експериментальне дослідження трафіку в комп'ютерних мережах**

З метою перевірки правильності роботи розробленої інформаційної технології аналізу та прогнозування інтенсивності трафіку в комп'ютерних мережах було здійснено експериментальне дослідження трафіку комп'ютерної мережі на основі спостережень над комп'ютерною мережею кафедри автоматизованих систем управління (АСУ) НУ ЛП. З метою підтвердження коректності дослідження зібраних зразків трафіку інструментом для дослідження вибрано аналізатор мережевих протоколів Wireshark, який є доступним для безкоштовного завантаження та встановлення, який був підключений до дзеркального порту вузлового маршрутизатора [3]. Дані з виходу аналізатора подавались через порт Ethernet на АРМ проведення експериментів, ПЗ котрого дозволяло досліджувати отримані результати. При проведенні досліджень було прийнято одногодинний формат запису зареєстрованих показань аналізатора через кожен секунду. Тобто, кожен файл представляв вибірку даних розміром як мінімум 3600 показників. Цей

обсяг вибірки за будь-якими статистичними критеріями може вважатися представницьким [55,65]. Здійснений аналіз трафіку використовується для оптимізації завантаження вузлового обладнання та перевірки достовірності розроблених математичних моделей трафіку у мережі.

Для апробації теоретичних розрахунків (див. розділ 2), необхідно було провести експериментальні дослідження трафіку у комп'ютерних мережах. Для збору експериментальних даних завантаження мережі використана мережа кафедри АСУ НУ «ЛП» (травень 2015р.). Збір даних проводився за допомогою інструментів середовища Wireshark. Також було розглянуто дані місячного трафіку (травень 2015 р.) комп'ютерної мережі Інституту теоретичної та прикладної інформатики Польської Академії наук (ПАН), надані у рамках співпраці з НУ «ЛП» [108]. Дані, отримані протягом травня 2015 року через Інтернет-шлюзи Інституту теоретичної та прикладної інформатики ПАН в Глівіце, Польща (наведені в Додатку 1).

Трафік ITAI PAS приблизно містить дані кількох десятків офісних користувачів (дослідників), які в основному працюють з понеділка по п'ятницю з 8 ранку до 4 вечора. 1-3 травня в Польщі – державні вихідні, таким чином трафіку могло бути менше. Деяку перерву в даних трафіку зафіксовано 22 травня о 14:53:32 2014 СЕТ. IP-пакети були обмежені 64 байтами - в більшості випадків вони містять всі заголовки, плюс кілька байтів корисного навантаження транспортного протоколу. Місцевий трафік DNS є невидимим, через здійснені попередньо конкретні налаштування мережі. IP-адреси не є анонімними.

Мережа кафедри АСУ містить близько 20 робочих комп'ютерів співробітників, що завантажені в середньому з 8:30 до 17:30, близько 4 комп'ютерів завантажені до 21:00, та 3 комп'ютерні класи з 32 робочими станціями, які завантажені в середньому з 8:30 до 16:00 [23, 70].

На рисунках 4.2-4.4 показано вибірккові результати спостережень у такому вигляді, який відображає середовище Wireshark. На рис.4.2 продемонстровано такі дані: номер пакета, орієнтовний час одержання пакету (лічба пакетів починається з першого пакета; параметри зображення часу змінюються у налаштуваннях), IP адреса відправника інформації, IP адреса одержувача інформації, протокол, за

правилами якого пересилаються дані, а також додаткова інформація про ці дані. З метою покращення ідентифікування даних, різні протоколи передачі даних показані різними кольорами, що покращує наочність та спрощує їхній аналіз. У нижній частині інтерфейсу видно вікно, у якому зображена детальна інформація про дані згідно мережевої моделі OSI.

No.	Time	Source	Destination	Protocol	Length	Info
1	0.000000	95.58.173.113	192.168.1.3	UDP	62	Source port: 24378 Destination port: 39225
2	1.154168	192.168.1.3	95.58.173.113	UDP	1451	Source port: 39225 Destination port: 24378
3	1.776097	95.58.173.113	192.168.1.3	UDP	62	Source port: 24378 Destination port: 39225
4	1.776491	192.168.1.3	95.58.173.113	UDP	1451	Source port: 39225 Destination port: 24378
5	1.889259	192.168.1.3	221.195.8.113	UDP	145	Source port: 39225 Destination port: 6881
6	1.889792	192.168.1.3	117.218.59.117	UDP	145	Source port: 39225 Destination port: 42033
7	2.141893	117.218.59.117	192.168.1.3	UDP	331	Source port: 42033 Destination port: 39225
8	2.142272	192.168.1.3	71.62.99.7	UDP	145	Source port: 39225 Destination port: 6881
9	2.315547	71.62.99.7	192.168.1.3	UDP	341	Source port: 6881 Destination port: 39225
10	2.315931	192.168.1.3	71.62.99.7	UDP	145	Source port: 39225 Destination port: 6881
11	2.324877	221.195.8.113	192.168.1.3	UDP	341	Source port: 6881 Destination port: 39225
12	2.325193	95.58.173.113	192.168.1.3	UDP	62	Source port: 24378 Destination port: 39225
13	2.325218	192.168.1.3	191.181.206.166	UDP	145	Source port: 39225 Destination port: 33619
14	2.356252	95.58.173.113	192.168.1.3	UDP	62	Source port: 24378 Destination port: 39225
15	2.370879	108.160.167.158	192.168.1.3	TLSv1	331	Application Data
16	2.375585	192.168.1.3	108.160.167.158	TLSv1	432	Application Data, Application Data
17	2.483369	71.62.99.7	192.168.1.3	UDP	341	Source port: 6881 Destination port: 39225
18	2.483743	192.168.1.3	61.170.251.117	UDP	145	Source port: 39225 Destination port: 6881
19	2.600428	108.160.167.158	192.168.1.3	TCP	54	443->9530 [ACK] seq=278 Ack=379 win=83 Len=0
20	2.623093	191.181.206.166	192.168.1.3	UDP	331	Source port: 33619 Destination port: 39225
21	2.623476	192.168.1.3	64.222.192.254	UDP	145	Source port: 39225 Destination port: 6881
22	2.781457	64.222.192.254	192.168.1.3	UDP	145	Source port: 6881 Destination port: 39225
23	2.781782	192.168.1.3	64.222.192.254	UDP	331	Source port: 39225 Destination port: 6881
24	2.922618	61.170.251.117	192.168.1.3	UDP	341	Source port: 6881 Destination port: 39225
25	2.941314	64.222.192.254	192.168.1.3	UDP	331	Source port: 6881 Destination port: 39225
26	3.686130	192.168.1.3	95.58.173.113	UDP	1451	Source port: 39225 Destination port: 24378
27	4.267369	95.58.173.113	192.168.1.3	UDP	62	Source port: 24378 Destination port: 39225
28	4.267629	192.168.1.3	95.58.173.113	UDP	1451	Source port: 39225 Destination port: 24378
29	4.966395	95.58.173.113	192.168.1.3	UDP	62	Source port: 24378 Destination port: 39225
30	6.201915	192.168.1.3	95.58.173.113	UDP	1451	Source port: 39225 Destination port: 24378
31	6.760153	95.58.173.113	192.168.1.3	UDP	62	Source port: 24378 Destination port: 39225
32	6.760307	192.168.1.3	95.58.173.113	UDP	1451	Source port: 39225 Destination port: 24378
33	7.394411	192.168.1.3	255.255.255.255	DB-LSP-	157	Dropbox LAN sync Discovery Protocol
34	7.396357	192.168.1.3	255.255.255.255	DB-LSP-	157	Dropbox LAN sync Discovery Protocol
35	7.396497	192.168.1.3	255.255.255.255	DB-LSP-	157	Dropbox LAN sync Discovery Protocol
36	7.396610	192.168.1.3	255.255.255.255	DB-LSP-	157	Dropbox LAN sync Discovery Protocol
37	7.396725	192.168.1.3	192.168.1.255	DB-LSP-	157	Dropbox LAN sync Discovery Protocol
38	7.396835	192.168.1.3	255.255.255.255	DB-LSP-	157	Dropbox LAN sync Discovery Protocol
39	7.402657	95.58.173.113	192.168.1.3	UDP	62	Source port: 24378 Destination port: 39225
40	8.733655	192.168.1.3	95.58.173.113	UDP	1451	Source port: 39225 Destination port: 24378
41	8.890027	192.168.1.3	221.195.8.113	UDP	145	Source port: 39225 Destination port: 6881
42	8.890302	192.168.1.3	117.218.59.117	UDP	145	Source port: 39225 Destination port: 42033
43	9.147197	117.218.59.117	192.168.1.3	UDP	331	Source port: 42033 Destination port: 39225
44	9.147421	192.168.1.3	71.62.99.7	UDP	145	Source port: 39225 Destination port: 6881
45	9.315622	71.62.99.7	192.168.1.3	UDP	341	Source port: 6881 Destination port: 39225
46	9.315970	192.168.1.3	71.62.99.7	UDP	145	Source port: 39225 Destination port: 6881

Frame 1: 62 bytes on wire (496 bits), 62 bytes captured (496 bits)  
 Ethernet II, Src: Tp-Link\_Tc:33:cc (00:1d:0f:ce:33:cc), Dst: IntelCor\_d2:13:01 (68:17:29:d2:13:01)  
 Internet Protocol Version 4, Src: 95.58.173.113 (95.58.173.113), Dst: 192.168.1.3 (192.168.1.3)  
 User Datagram Protocol, Src Port: 24378 (24378), Dst Port: 39225 (39225)  
 Data (20 bytes)  
 0000 68 17 29 d2 13 01 00 1d 0f ce 33 cc 08 00 45 00 h.).....3...E.  
 0010 00 30 30 44 00 00 74 11 48 22 5f 3a ad 71 c0 a8 .00d.t. h".:q..  
 0020 01 03 5f 3a 99 39 00 1c 26 49 21 00 95 76 d3 df .: .9. &1;.V..  
 0030 ac 31 46 6b 1c 40 00 00 bd e3 42 60 79 2a .!fK.@...B'y\*

Рис.4.2 Відображення частини даних мережевого трафіку кафедри АСУ в середовищі Wireshark.

Найнижча частина вікна на рис. 4.2 демонструє пакет в шістнадцятковій формі, тобто побайтово. Налаштування інтерфейсу можуть бути легко зміненими в меню View. Наприклад, є змога закрити вікно побайтового подання пакета (Packet Bytes в меню View) за бажанням, так як в більшості випадків (за винятком аналізу даних у пакеті) воно не є потрібним та лише повторює інформацію, отриману з вікна детального опису. На рис.4.4 зображено частину добового трафіку кафедри

автоматизованих систем управління НУ «ЛП», що візуалізована засобами Wireshark.

Частина узагальненої вибірки даних подана в табл.4.1.

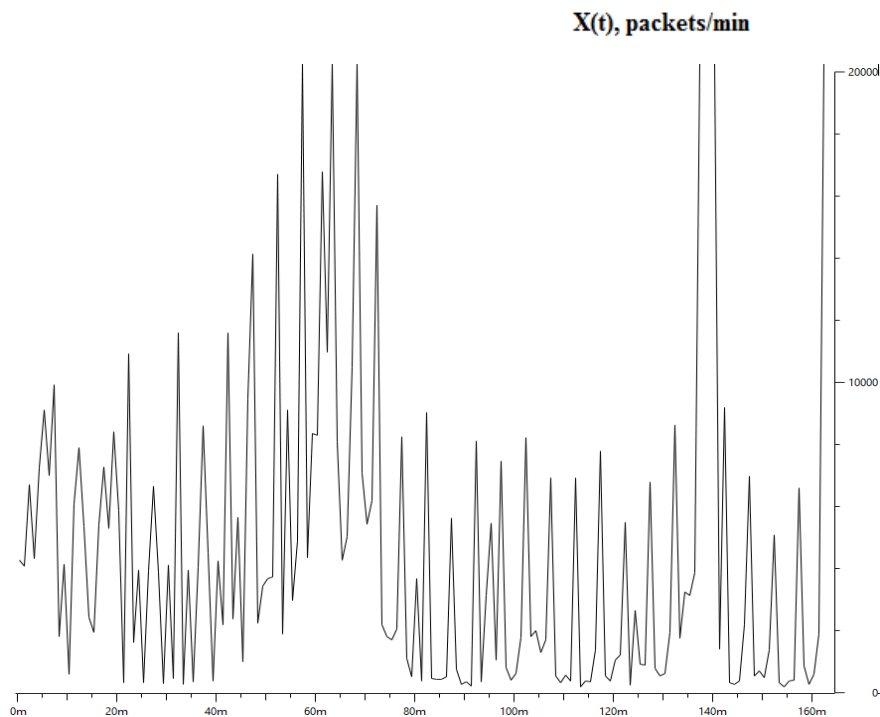


Рис. 4.3 Частина даних трафіку (2 год. 40 хв) за 01.05.14 у Інституті теоретичної та прикладної інформатики ПАН

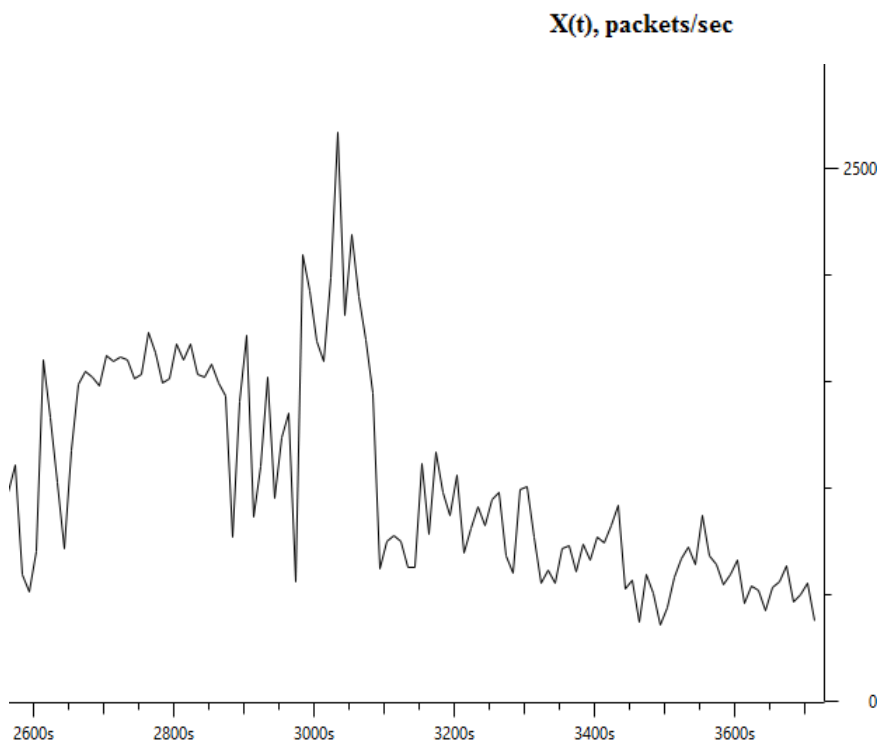


Рис. 4.4 Частина добового трафіку (16,6 хв.) комп'ютерної мережі кафедри АСУ в середовищі Wireshark.

**Сумарні добові дані трафіку кафедри АСУ НУ «ЛП» за період 17.02-  
23.02.2015**

Таблиця 4.1

17.02.2015		
Назва показника	НУ «ЛП» (день)	НУ «ЛП» (ніч)
Кількість пакетів	1635345	2340903
Тривалість захоплення (сек)	21803, 687	21555,93
Середня к-ть пакетів/сек	108,597	75,003
Середній розмір пакета (байт)	792	692
Середня к-ть байт/сек	66052,059	31909,328
18.02.2015		
Назва показника	НУ «ЛП» (день)	НУ «ЛП» (ніч)
Кількість пакетів	1364822	575179
Тривалість захоплення (сек)	21619,284	21595,292
Середня к-ть пакетів/сек	63,130	26,634
Середній розмір пакета (байт)	698	614
Середня к-ть байт/сек	44066,690	16340,517
19.02.2015		
Назва показника	НУ «ЛП» (день)	НУ «ЛП» (ніч)
Кількість пакетів	1781818	137184
Тривалість захоплення (сек)	21345,855	21599,663
Середня к-ть пакетів/сек	79,738	6,351
Середній розмір пакета (байт)	755	471
Середня к-ть байт/сек	60185,722	2989,050
20.02.2015		
Назва показника	НУ «ЛП» (день)	НУ «ЛП» (ніч)
Кількість пакетів	1605884	274321
Тривалість захоплення (сек)	21607,273	21574,014
Середня к-ть пакетів/сек	74,321	12,715

Середній розмір пакета (байт)	809	578
Середня к-ть байт/сек	60104,673	7357,042
21.02.2015		
Назва показника	НУ «ЛП» (день)	НУ «ЛП» (ніч)
Кількість пакетів	1537954	331872
Тривалість захоплення (сек)	21651,566	21600,403
Середня к-ть пакетів/сек	71,032	15,364
Середній розмір пакета (байт)	704	344
Середня к-ть байт/сек	50029,882	5292,749
22.02.2015		
Назва показника	НУ «ЛП» (день)	НУ «ЛП» (ніч)
Кількість пакетів	422899	228289
Тривалість захоплення (сек)	21655,512	21563,267
Середня к-ть пакетів/сек	19,528	10,587
Середній розмір пакета (байт)	689	273
Середня к-ть байт/сек	13451,908	2891,262
23.02.2015		
Назва показника	НУ «ЛП» (день)	НУ «ЛП» (ніч)
Кількість пакетів	869697	159097
Тривалість захоплення (сек)	21597,469	21592,413
Середня к-ть пакетів/сек	40,268	7,368
Середній розмір пакета (байт)	621	617
Середня к-ть байт/сек	25021,540	4545,977

Під час проведення цих досліджень було використано експериментальні дані трафіку комп'ютерної мережі АСУ НУ «ЛП», отримані за допомогою середовища Wireshark. Проведено аналіз трафіку та обробку отриманих даних. Результати показані на рис.4.5-4.9. На рис.4.5 представлено дані сумарного трафіку комп'ютерної мережі. На рис.4.6 показана середня кількість пакетів трафіку. На рис.4.7 та на рис.4.8 відображено середній розмір пакету та середня швидкість



передавання пакетів відповідно. Як видно з рис.4.5 сумарний трафік суттєво зменшується в кінці тижня (21.02.-22.02- вихідні дні). На рис.4.6 показує, що графік зміни середньої кількості пакетів має такий самий характер як графік сумарного трафіку. Рис.4.7 демонструє малу залежність середнього розміру пакетів від завантаження мережі.



Рис.4.5 Сумарна кількість інформаційних пакетів трафіку комп'ютерної мережі



Рис.4.6 Середня кількість інформаційних пакетів трафіку комп'ютерної мережі

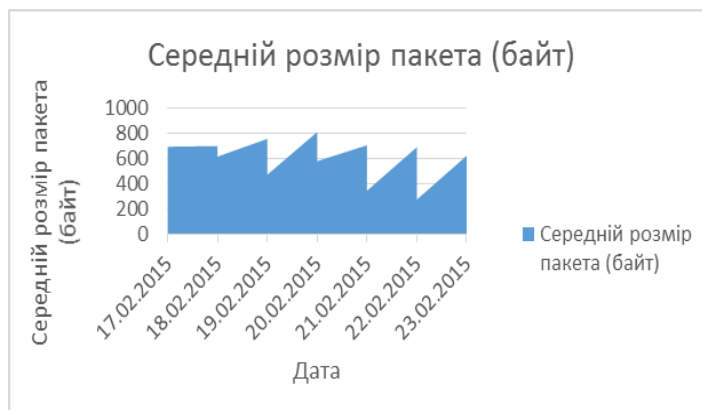


Рис.4.7 Середній розмір інформаційного пакету комп'ютерної мережі.



Рис.4.8 Середня інформаційна швидкість передавання пакетів комп'ютерної мережі

Характер зміни швидкості передавання пакетів навпаки залежить від завантаження мережі (див. рис.4.8). Швидкість передавання пакетів тим більша, чим менша завантаженість мережі, що видно на рис.4.9.

Проведення цих експериментів здійснювалось з метою відлагодження розробленої математичної моделі трафіку та методу прогнозування значень трафіку, а також перевіряння її роботи на різних завантаженнях каналів комп'ютерної мережі. З проведених експериментів видно, що розроблений метод може застосовуватись не тільки для аналізу трафіку у магістральних каналах передачі даних, а й у сегменті комп'ютерної мережі, однак у останньому випадку він не буде настільки ефективним, як у першому (що показано далі у цьому ж розділі) [26, 27], оскільки характер трафіку в сегменті комп'ютерної мережі не є сильно пульсуючим, на відміну від трафіку у магістральних каналах передачі даних, де він є сильно пульсуючим та самоподібним.

### 4.3 Порівняння розробленого методу прогнозування з методом, заснованим на обчисленні похідних

У цьому підрозділі з метою проведення оцінювання ефективності розробленого методу прогнозування було здійснено порівняння результатів розробленого прогнозування з результатами прогнозування, отриманими за допомогою методу прогнозування, що заснований на похідних [2], оскільки цей

метод є простим для реалізації та нескладним у своїх розрахунках. Також цей метод характеризується високим ступенем швидкодії, але часто є недостатньо точним.

Експеримент та обчислення були проведені за допомогою розробленого ПЗ для аналізу зразків трафіку комп'ютерної мережі. Зразки трафіку для проведення цього експерименту були отримані шляхом, описаним у попередньому підрозділі.

У [2, 45] цей метод був використаний для прогнозування тренду пакетного трафіку, однак у цьому випадку точність прогнозування не відіграла важливої ролі.

У нашому випадку точність прогнозу має достатньо важливе значення, оскільки ми прагнемо підвищити ефективність використання буферів мережного обладнання.

Для здійснення прогнозу на кожному кроці на основі методу прогнозування за допомогою похідних [2] достатньо використовувати лише три останні точки часового ряду, який моделює трафік. Звідси випливає, що цей метод можна застосовувати при умовах різкого підвищення інтенсивності пульсацій трафіку.

Алгоритм реалізації методу, що заснований на обчисленні похідних, полягає у наступному:

1. На поточному кроці вибираються дві останні точки прогнозу  $x_{-1}$  та  $x_0$  та знаходиться перша похідна ( $f_0'$ ) щодо значення для останнього кроку.

2. Обираються дві передостанні точки прогнозу  $x_{-2}$  та  $x_{-1}$  та знаходиться перша похідна відносно значення трафіку для передостаннього кроку ( $f_1'$ ).

3. За знайденими першими похідними знаходиться друга похідна ( $f_0''$ ) для останнього значення трафіку.

4. Величина приросту прогнозованого значення залежить від величини першої похідної ( $f_0'$ ), а його напрямок від величини другої похідної  $f_0''$ . Звідси випливає, що прогнозне значення трафіку на поточному кроці визначиться як

$$x_{\text{прогнозоване}} = \begin{cases} x_0(1 + f_0') + Z_{\text{const}}, & \text{якщо } f_0'' \geq 0 \\ x_0(1 - f_0') + Z_{\text{const}}, & \text{якщо } f_0'' < 0 \end{cases} \quad (4.6)$$

де  $x_{\text{прогнозоване}}$  - прогнозоване значення трафіку,  $x_0$  – попереднє прогнозоване значення трафіку,  $Z_{\text{const}}$  – певна константа, що характеризує випуклість функції апроксимації.

На наступному кроці процедура знаходження прогнозованих значень трафіку повторюється знову.

Алгоритм прогнозування трафіку, який використаний у цій роботі, з використанням похідних полягає у наступному:

1. Усі розрахункові параметри алгоритму прогнозування трафіку початково прирівнюються до нулів;

2. Далі відбувається перевіряння достатності вихідних даних для здійснення прогнозу (у даному випадку має бути у розпорядженні останні три точки часового ряду, що відтворює трафік). Якщо останні три точки часового ряду недоступні для здійснення прогнозування, то необхідно зачекати, поки така інформація стане доступною (доступність інформації описана в структурі ПЗ, яку розглянутого у третьому розділі), а з нею й достатня кількість вихідних даних. В іншому випадку відбувається перехід на крок 3;

3. Відбувається вибір двох передостанніх точок часового ряду і на основі цього розраховується значення першої похідної у попередній відносно до моменту прогнозу в точці ( $f_1'$ );

4. Далі відбираються дві останні точки часового ряду і на базі цих даних обчислюється значення першої похідної ( $f_0'$ );

5. За знайденими значеннями перших похідних для точки прогнозу обчислюється друга похідна функції, що відтворює трафік ( $f_0''$ );

6. Згідно обчислених значень перших двох похідних та задавши попередньо значення константи, котра характеризує випуклість функції апроксимації, визначається прогнозоване значення інтенсивності трафіку відповідно до рівняння (4.6), яка у подальшому використовується для побудови графічного відображення прогнозу за потреби користувача (див. розділ 3);

7. Здійснюється перехід на крок 1.

Очевидно, що алгоритм прогнозування трафіку з використанням похідних дуже простий та дуже зручний для запрограмування. Крім того, він не потребує великої кількості вихідних даних, що означає, що програмна реалізація цього алгоритму матиме високу швидкодію.

Вхідні дані проведених експериментів показано в таблиці 4.4.

#### Вхідні дані експериментів

Таблиця 4.4

№ Експерименту	Часовий інтервал вибірки (год.)	Кількість точок для прогнозування (метод похідних)	Тип Ateb-функції (для паралельного прогнозування)
Експеримент № 1	7	3	Sa(1,1/3)
Експеримент № 2	6	3	Sa(1/3,1)
Експеримент № 3	12	3	Sa(1/7,3)
Експеримент № 4	24	3	Sa(1/3,1)
Експеримент № 5	24	3	Sa(1/3,1)
Експеримент № 6	24	3	Sa(1/3,1)
Експеримент № 7	24	3	Sa(1/3,1)
Експеримент № 8	24	3	Sa(1/5,1)
Експеримент № 9	24	3	Sa(1/5,1)
Експеримент № 10	24	3	Sa(1/7,3)

Результати здійснення прогнозування за допомогою методу обчислення похідних показані на рис. 4.18-4.20.

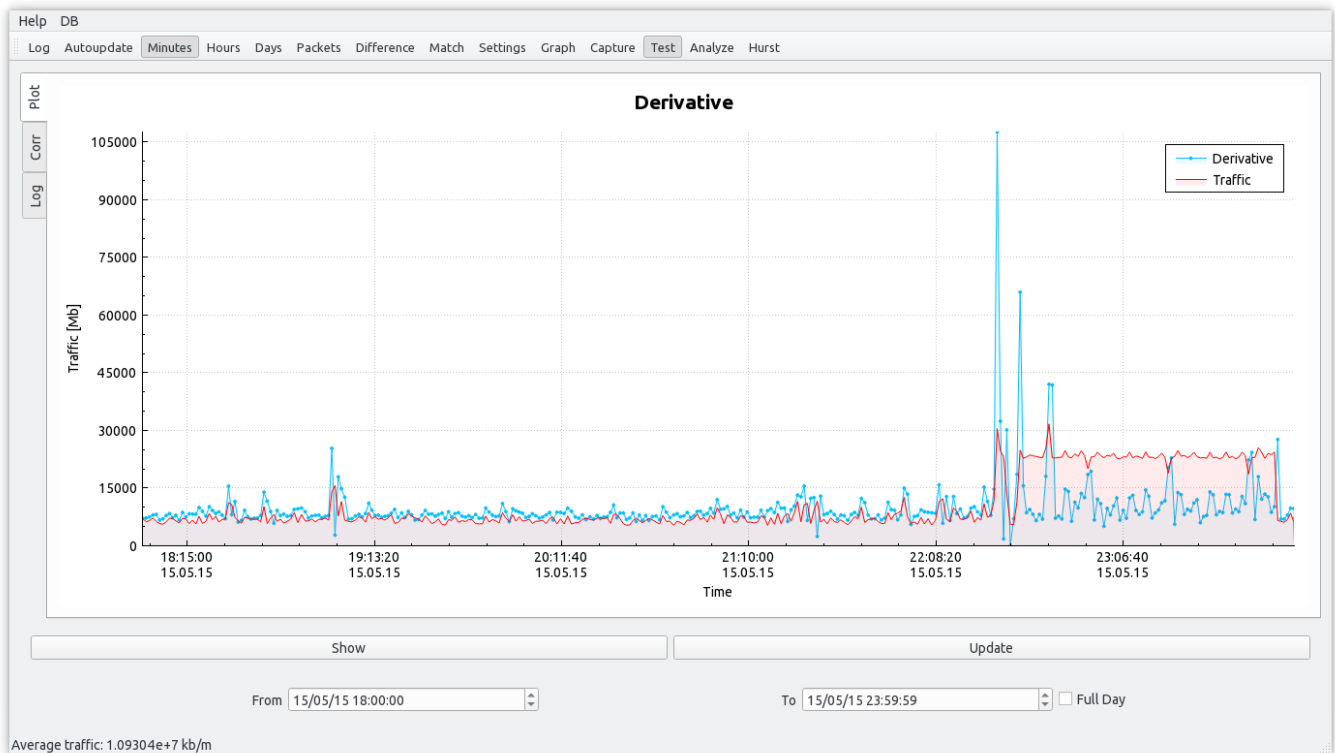


Рис.4.18 Результат прогнозування за допомогою методу похідних для Експерименту №1

Результати прогнозування інтенсивності трафіку даних за допомогою розробленого методу короткострокового прогнозування інтенсивності трафіку даних було представлено у розділі 3.

Згідно графіків, представлених вище, та таблиці результатів проведення експериментів можна зробити висновок, що метод короткострокового прогнозування інтенсивності трафіку даних дає кращі результати в прогнозуванні інтенсивності трафіку та значно менші втрати пакетів з даними, ніж метод прогнозування трафіку, що заснований на похідних. Особливо помітною є різниця між цими методами на великих часових вибірках трафіку.

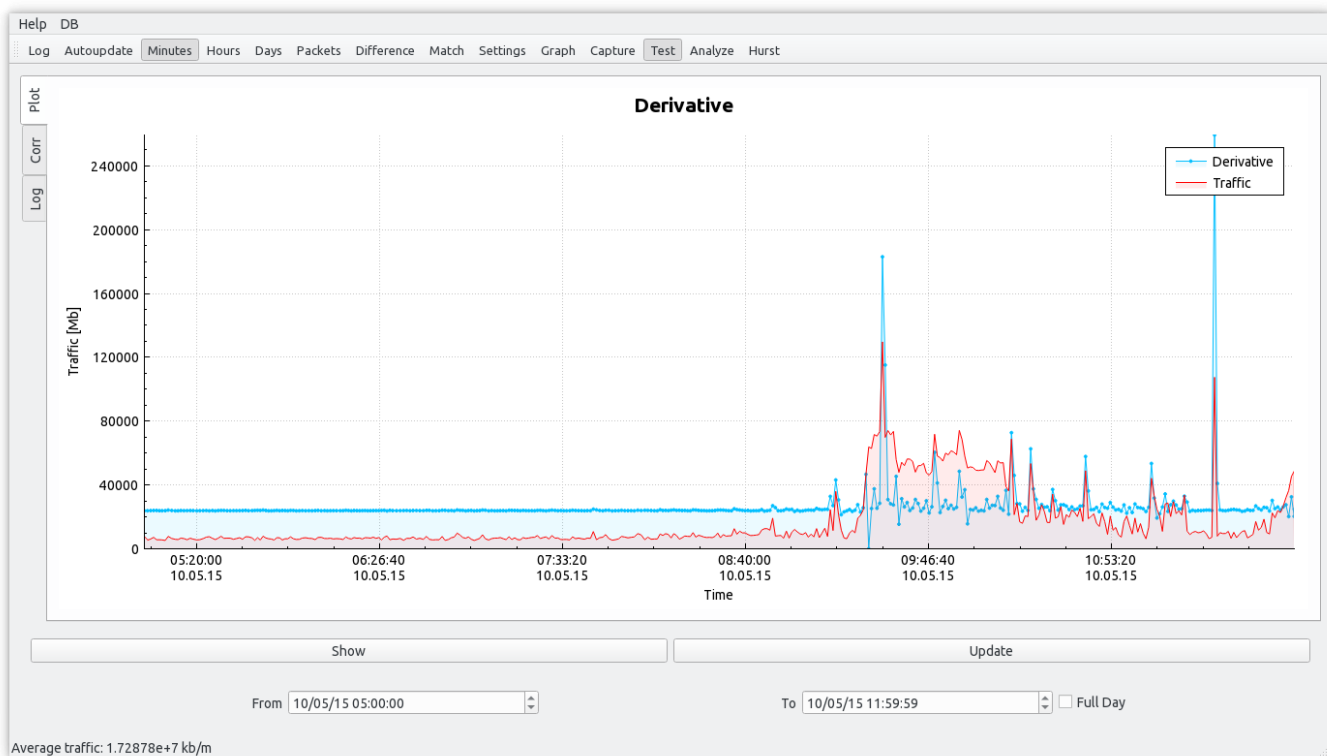


Рис. 4.19 Результат прогнозування за допомогою методу похідних для Експерименту №2

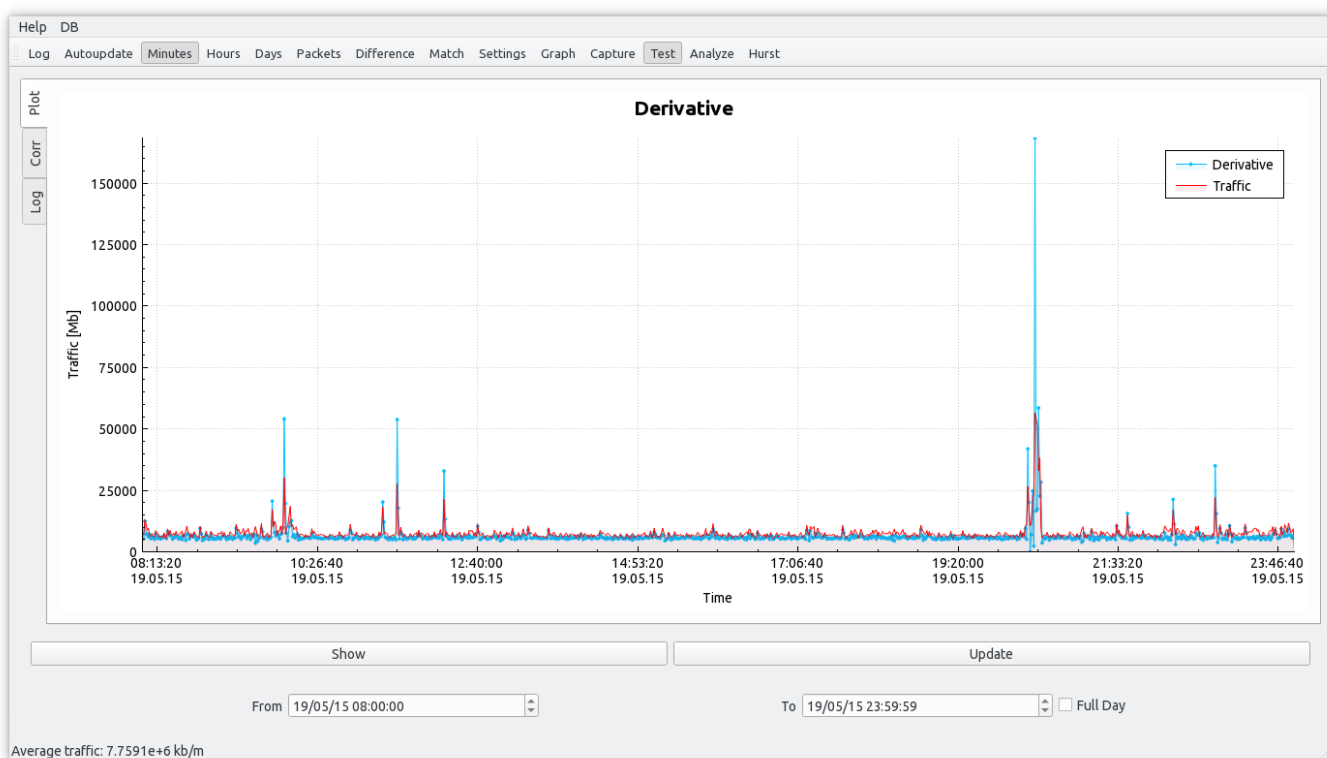


Рис. 4.20 Результат прогнозування за допомогою методу похідних для Експерименту №3

У таблиці 4.5 представлено оцінювання відносного показника кількості пакетів зі затримкою, більшою за стандартну.

**Результати оцінювання часток пакетів зі затримкою, більшою за стандартну після застосування обох методів прогнозування**

*Таблиця 4.5*

Частка пакетів зі затримкою, більшою за стандартну (Розроблений метод)	Частка пакетів зі затримкою, більшою за стандартну (Метод похідних)	Відносний показник кількості пакетів затримкою, більшою за стандартну, %
0,204938	0,269136	23,85336781
0,255747	0,706897	63,82117904
0,0833333	0,488542	82,94244917
0,0420044	0,490789	91,44145447
0,0201794	0,233184	91,34614725
0,156616	0,688211	77,24266202
0,116026	0,46773	75,19380839
0,0969131	0,46773	79,28011887
0,0056614	0,159032	96,44008753
0,0162942	0,08653	81,16277457

На рис. 4.21 представлено порівняння обох методів прогнозування за відносним показником кількості пакетів зі затримкою, більшою за стандартну. На рис. 4.22 зображено середні значення пакетів зі затримкою, більшою за стандартну для методу короткострокового прогнозування інтенсивності трафіку та методу прогнозування на основі похідних. Дані були отримані за допомогою розробленого аналізатора трафіку.



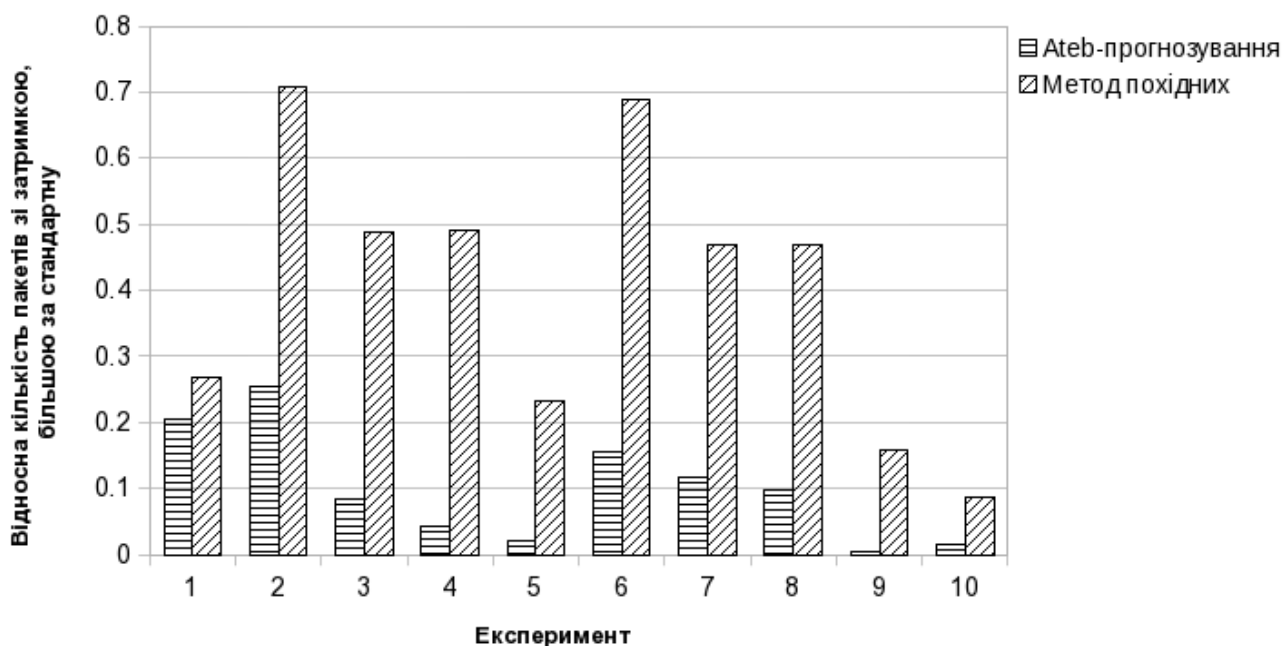


Рис. 4.21 Порівняння розробленого методу та методу прогнозування, на основі похідних

Рис. 4.22 підтверджує ефективність роботи методу короткострокового прогнозування інтенсивності трафіку даних, оскільки у відсотковому співвідношенні всього 10% пакетів зі затримкою, більшою за стандартну присутні у вузлах комп'ютерної мережі, тоді як використання методу прогнозування на основі похідних дає значно гірші результати – тут таких пакетів аж 40,6%. Тобто метод короткострокового прогнозування інтенсивності трафіку даних показує кращі результати порівняно з методом прогнозування на основі похідних на 30,6%.

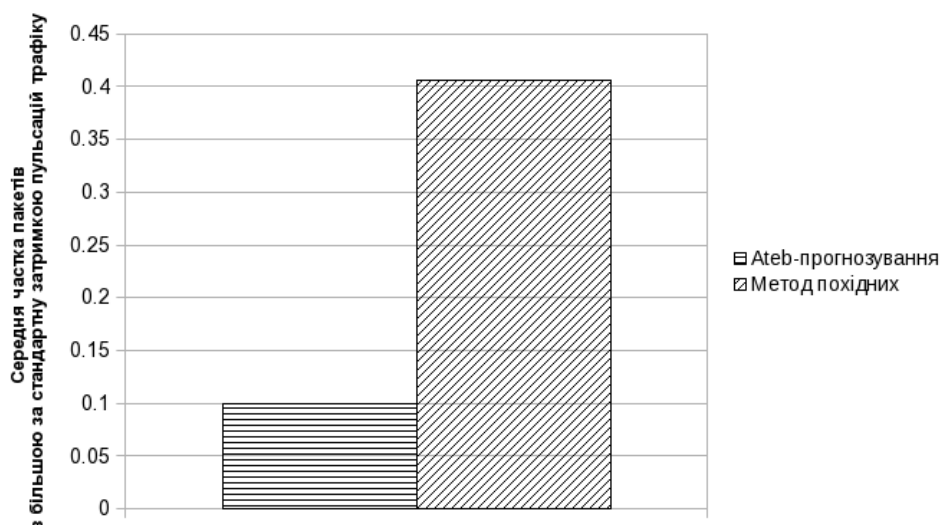


Рис. 4.22 Порівняння розробленого методу прогнозування та методу прогнозування, на основі похідних

#### 4.4 Характеристика програмного забезпечення для комп'ютерного імітаційного моделювання роботи мережі

На сьогоднішній день відомою є досить велика кількість комерційних та вільно доступних програмних симуляторів комп'ютерних мереж. Ці всі різновиди програмного забезпечення мають свої переваги та недоліки, а також області застосування та популярність серед користувачів. Найбільшої уваги, з точки зору фінансової доступності, заслуговують наступні: 1) J-Sim [124], 2) OMNeT++ [128], 3) NS-2 [89].

1) J-Sim – середовище для комп'ютерного імітаційного моделювання мереж, створене за допомогою мови програмування Java. Програмне забезпечення є компонентно-орієнтованим, у ньому будь-які об'єкти можуть відігравати роль компонентів: з'єднання, протокол, комп'ютер. Враховуючи цю властивість, кожен обраний компонент може як бути цілісним, так і складатись з довільної кількості інших компонентів. З'єднання між компонентами встановлюється з допомогою змодельованих портів. Доступними для використання є три типи з'єднань для портів. До моделі можна додавати власноруч створені компоненти, або використовувати існуючі компоненти, чи перевизначати їхні атрибути та методи за допомогою мови програмування Java.

Крім того, програмне забезпечення передбачає наявність спеціальної компоненти для перегляду отриманих статистичних результатів імітаційного моделювання, але відсутня можливість візуалізувати роботи комп'ютерної мережі протягом моделювання. Варто зауважити, що програмне забезпечення J-Sim містить детерміністичні моделі, тобто результати всі отримані результати є однаковими, незалежно від кількості разів, коли здійснювався перезапуск моделювання.

Середовище J-Sim є доступним для встановлення на будь-якій операційній системі, на якій попередньо встановлено Java SDK.

2) OMNeT ++ - це пакет програмного забезпечення, який є якісним інструментом для імітаційного моделювання роботи комп'ютерних мереж, який має в своєму розпорядженні ресурси для побудови комп'ютерних мереж різного

масштабу та різної архітектури топологій [116]. Це програмне забезпечення має велику базу даних мережевих елементів, готових до використання, які вже містять алгоритми моделювання та етапи обробки інформації про комп'ютерну мережу, включаючи час, вартість операцій.

Відомо [119], що результати теоретичних наближень математичних моделей тестують на основі пакету OMNeT ++.

OMNeT ++ є розширюваним, модульним програмним забезпеченням на основі компонентів бібліотек та шаблонів моделювання C ++ бібліотек, в першу чергу для створення та побудови мережевих тренажерів. OMNeT ++ пропонує Eclipse, на основі IDE, в якості графічного середовища виконання, а також безліч інших інструментів. Також є доступними для використання розширення для моделювання в реальному часі, емуляції мережі, інтеграції баз даних, інтеграція SystemC та ряд інших функцій.

OMNeT++ – одне з небагатьох середовищ для імітаційного моделювання мереж, яке дає змогу переглядати результати моделювання під час його виконання. При цьому інженер може призупинити роботу імітаційної моделі, переглянути потрібну інформацію, внести корективи в параметри імітаційної моделі та за необхідності продовжити імітаційне моделювання. OMNeT++ працює на операційних системах Linux/Unix, а також Windows.

3) Середовище для імітаційного моделювання NS-2. Було створене за допомогою двох мов програмування C++ та OTcl. Остання дає змогу інтерпретувати сценарії роботи комп'ютерної мережі.

У середовищі NS-2 запропоновано використовувати урізану OSI модель з відстуніми рівнями представлення та сеансовим. У даному програмному забезпеченні доступною є велика кількість готових протоколів і сценаріїв для моделювання комп'ютерних мереж різних типів. Структура середовища є складною, що погіршує процес додавання нових компонентів, тому що вимагає деталізованих знань архітектури та функціоналу середовища. Зібравши сценарій моделювання на мові OTcl, слід пов'язати цей сценарій з відповідними компонентами мови C++, за допомогою створення програмних компонентів OTcl для відповідних компонентів

мови C++. Крім того, візуалізація результатів моделювання є доволі складною. Візуалізація в цьому середовищі вимагає створення двох скриптових програм для генерації файлів змін та трасування. Наступним кроком є необхідно візуалізувати роботу складеної моделі за допомогою Tcl-інтерпретатора та графічного аніматора `nam`. Для зображення отриманих статистичних результатів моделювання використовують зовнішнє програмне забезпечення, таке як `gnuplot` чи `xgraph`. Програмне забезпечення NS-2 можна встановлювати на операційних системах типу UNIX та Windows.

У працях [91, 113, 121-123] показано, що програмне забезпечення для імітаційного моделювання комп'ютерних мереж, яке б охоплювало увесь необхідний функціонал для дослідження роботи комп'ютерної мережі, поки що не створено. Кожне з типів ПЗ має свої переваги та недоліки. Середовище J-Sim має компонентно-орієнтовану архітектуру, а середовище OMNeT++ володіє якісною графічною оболонкою, що покращує роботу над створенням власних протоколів для роботи комп'ютерної мережі. Для середовища NS-2 розроблено велику кількість шаблонних імітаційних моделей для роботи комп'ютерної мережі та існуючих мережевих протоколів. Однак для завдань, поставлених у дисертаційній роботі, чудово підійде середовище OMNeT++, оскільки воно дає змогу графічно візуалізувати отримані результати, а також спостерігати за зміною параметрів імітаційного моделювання комп'ютерної мережі, що є необхідним для якісного оцінювання результатів короткострокового прогнозування пульсацій трафіку.

#### **4.5 Тестування розробленого методу прогнозування інтенсивності трафіку комп'ютерних мереж для дослідження характеристик комп'ютерної мережі**

У цьому підрозділі для більш детального визначення параметрів завантаженості комп'ютерної мережі було проведено імітаційне моделювання комп'ютерної мережі з метою визначення того, як впливає застосування розробленого методу прогнозування інтенсивності трафіку на завантаженість

вузлового обладнання комп'ютерної мережі, а також додатково описано, розроблено та удосконалено метод маршрутизації трафіку для знаходження обхідних шляхів.

Було проведено імітаційне моделювання з використанням методу короткострокового прогнозування інтенсивності трафіку даних існуючої комп'ютерної мережі, топології якої та дані для моделювання отримані з [119]. The Orpe Project був використаний для збору даних з глобальної комп'ютерної мережі (детальніше описаний у розділі 1) [113]. Імітаційне моделювання тут є необхідним етапом, який підтверджує теоретичні очікування і служить додатковою базою для обґрунтування впровадження розробленого методу прогнозування.

В експериментальній мережі знаходились моделі актуальних на сьогоднішній день пристроїв, які відповідають стандартам IEEE802 (група стандартів для локальних комп'ютерних мереж та мереж мегаполісів.) [110].

З метою доведення правдивості отриманих результатів експериментів інструментом для імітаційного моделювання був обраний програмний пакет OMNeT++, який має в своєму розпорядженні засоби для побудови комп'ютерних мереж різних масштабів та топологій [120]. Інтерфейс OMNeT++ зображений на рис. 4.23.

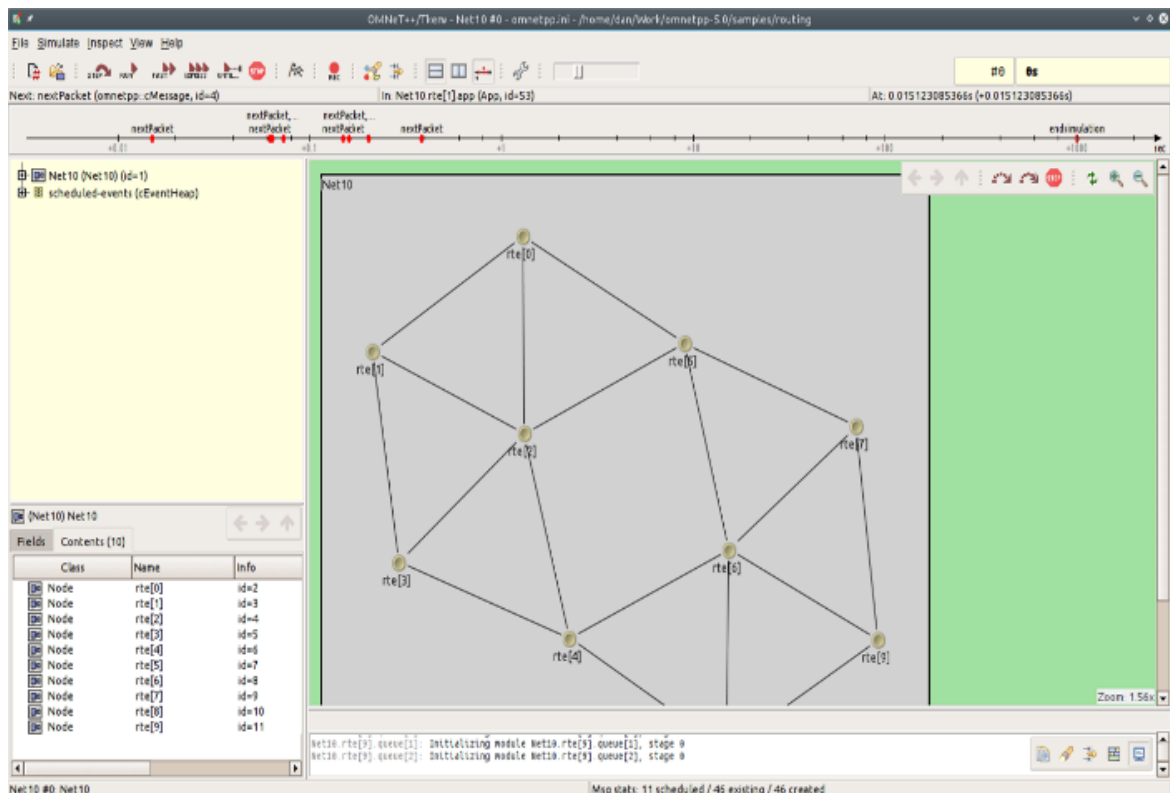


Рис. 4.23 Інтерфейс програмного забезпечення OMNeT++

Дане ПЗ має велику базу даних готових мережевих елементів, які вже місять в собі алгоритми імітації, моделювання та етапів обробки мережевої інформації з врахуванням затрат часу та їх виконання реальними фізичними пристроями. Відомо [115], що результати теоретичних апроксимацій апробуються на основі використання OMNeT++.

Для проведення експериментів розроблений метод короткострокового прогнозування інтенсивності трафіку за допомогою Ateb-функцій було вбудовано в імітаційні моделі у середовищі OMNeT++. Програмне середовище моделювання комп'ютерних мереж OMNeT++ дає можливість вбудовувати в розроблені дослідниками імітаційні моделі комп'ютерних мереж програмний код, написаний на мові програмування C++. Вихідний код розробленого методу прогнозування інтенсивності трафіку за допомогою Ateb-функцій було додано до існуючої кодової бази моделі з можливістю викликати необхідні функції оброблення даних прогнозування та маршрутизації пакетів у функціях оброблення пакетів, розташованих в модулі routing у структурі вузла, розроблених для здійснення імітаційного моделювання топологій комп'ютерних мереж.

Вхідні дані проведеного імітаційного моделювання наведені в таблиці 4.6 (для топологій комп'ютерних мереж, які показані на Рис.4.25 та Рис.4.26 відповідно) [93].

На основі реальних даних про топологію мережі Інтернет була побудована імітаційна модель невеликої частини всесвітньої комп'ютерної мережі, структура вузла якої показана на рис.4.24.

Імітаційна модель втілювалась наступним чином: першим кроком було здійснено побудову структури вузла, яка в свою чергу складається з джерела генерування пакетів певного розміру та з певною частотою (різні вузли генерують пакети різного розміру та з різними часовими інтервалами передавання пакетів по каналах мережі), а також ці джерела є також і кінцевими пунктами призначення пакетів у мережі.

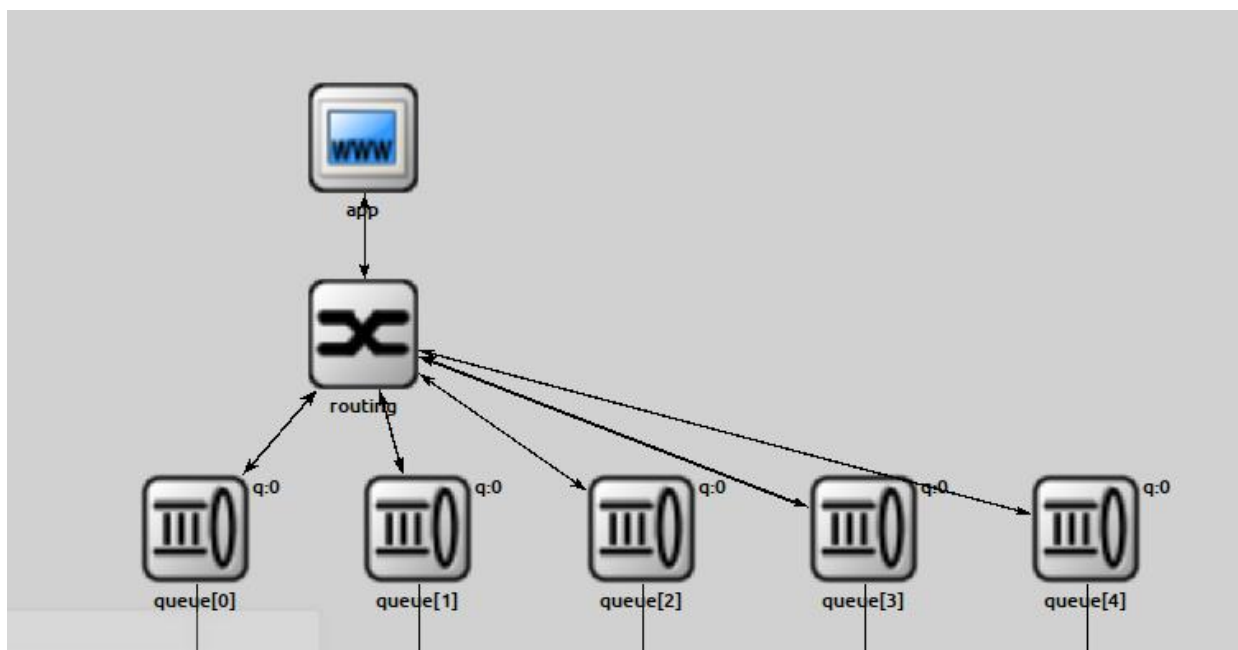


Рис. 4.24 Структура вузла в імітаційній моделі комп'ютерної мережі.

### Вхідні дані для проведення імітаційного моделювання

Таблиця 4.6

Параметри мережі	Назва комп'ютерної мережі	
	Мережа (Експеримент №1)	Мережа (Експеримент №2)
Вибірка пакетів в мережі	140000	140000
Кількість пакетів між вузлами <code>rte[9]</code> та <code>rte[1]</code>	99658	100540
Час симуляції, $s$ (вірт.)	1000	1000
Завантаження мережі, %	52.00	52.00

При обробці вхідного пакету він знищується, але дані про нього (затримка, кількість проміжних пунктів проходження маршруту) зберігаються для подальшого оброблення. Блок `routing` призначений для встановлення маршрутизації пакетів.

Цей блок приймає пакети з даними з блоків, які симулюють собою черги, і в залежності від того, чи адресовані вони для локального блоку `www`, вони

перенаправляються в іншу чергу або в цей блок.

Перенаправлення пакетів з даними відбувається в залежності від методу короткострокового прогнозування інтенсивності трафіку даних в комп'ютерній мережі та пов'язаного з ним методу маршрутизації пакетів трафіку даних у цій же комп'ютерній мережі.

У випадку, коли неможливим є знаходження шляху до пункту призначення, пакет скасовується. Блоки, які імітують роботу черг, містять в собі відповідні черги пакетів. Після цього було збудовано два варіанти топології комп'ютерної мережі для проведення імітаційного моделювання.

Пунктом відправлення пакетів було взято вузол  $rte(9)$ , а пунктом прибуття – вузол  $rte(1)$ . Наступним кроком відбувалась імітація навантаження на сегмент комп'ютерної мережі між вузлами  $rte(5)$  та  $rte(0)$ , яке полягало у збільшенні частоти генерування пакетів приблизно у 30 разів у вузлі  $rte(5)$ . Після початку імітаційного моделювання відбувався аналіз результатів та побудова відповідних графіків, зображених на рис. 4.27-4.28.

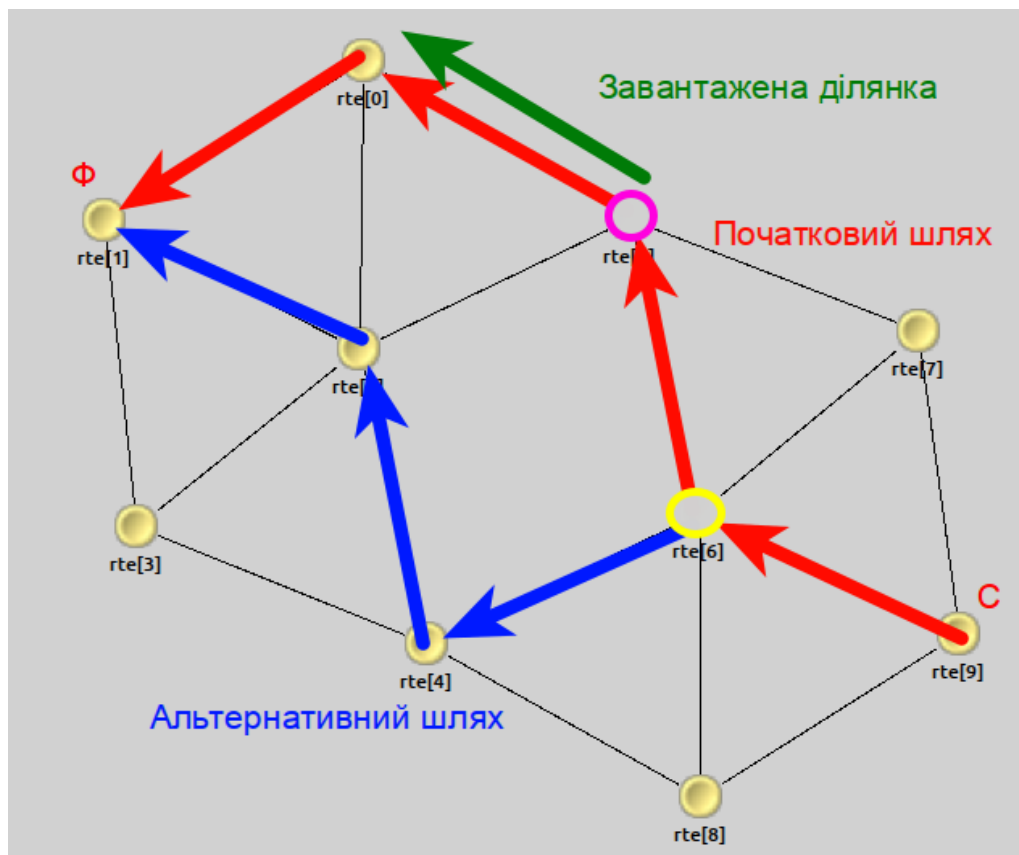


Рис. 4.25 Топологія експерименту №1 комп'ютерної мережі в імітаційній моделі.



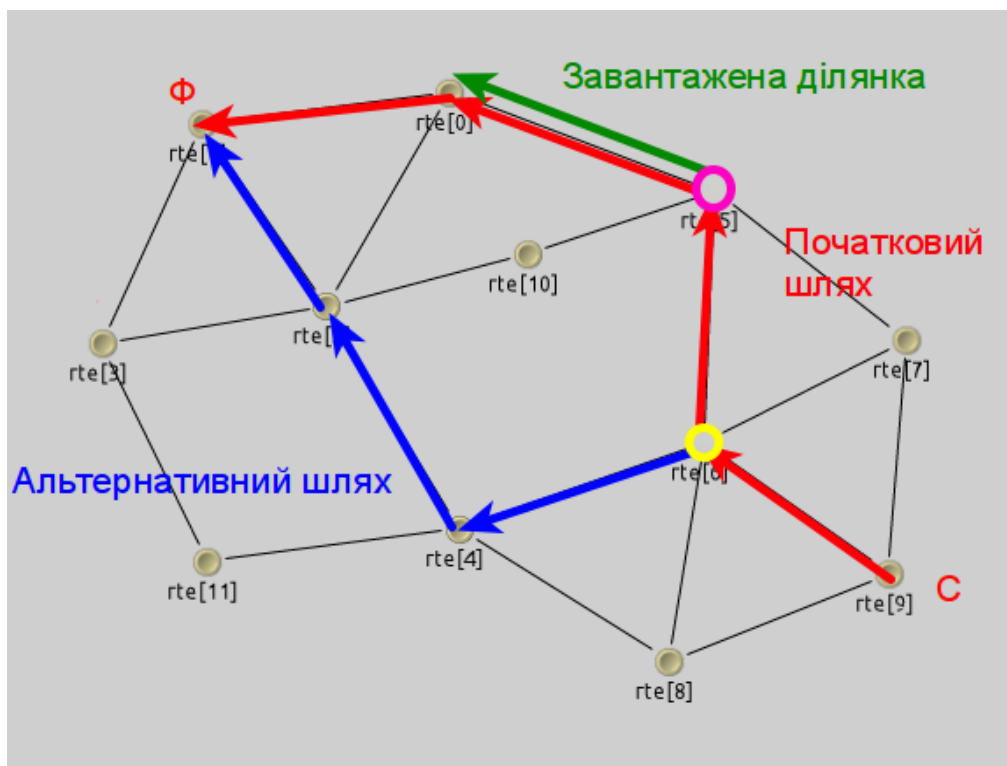


Рис. 4.26 Топологія експерименту №2 комп'ютерної мережі в імітаційній моделі.

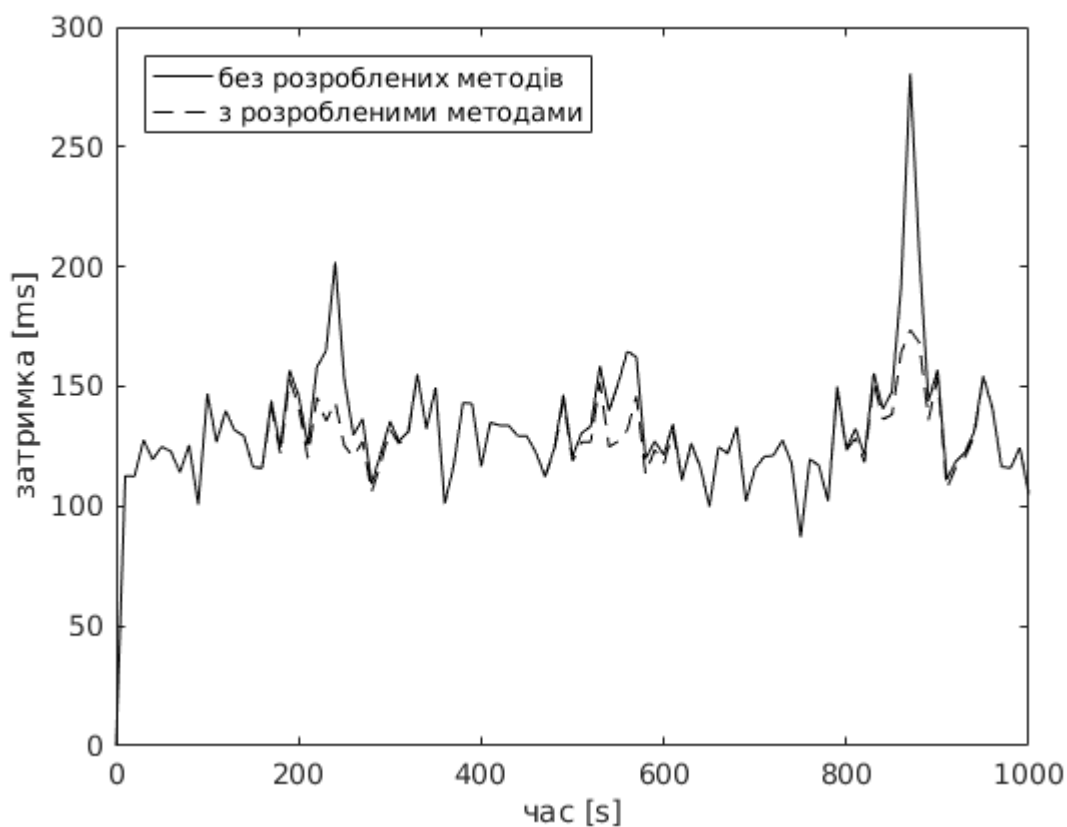


Рис. 4.27 Середня зміна джиттера в комп'ютерній мережі експерименту №1 імітаційної моделі.

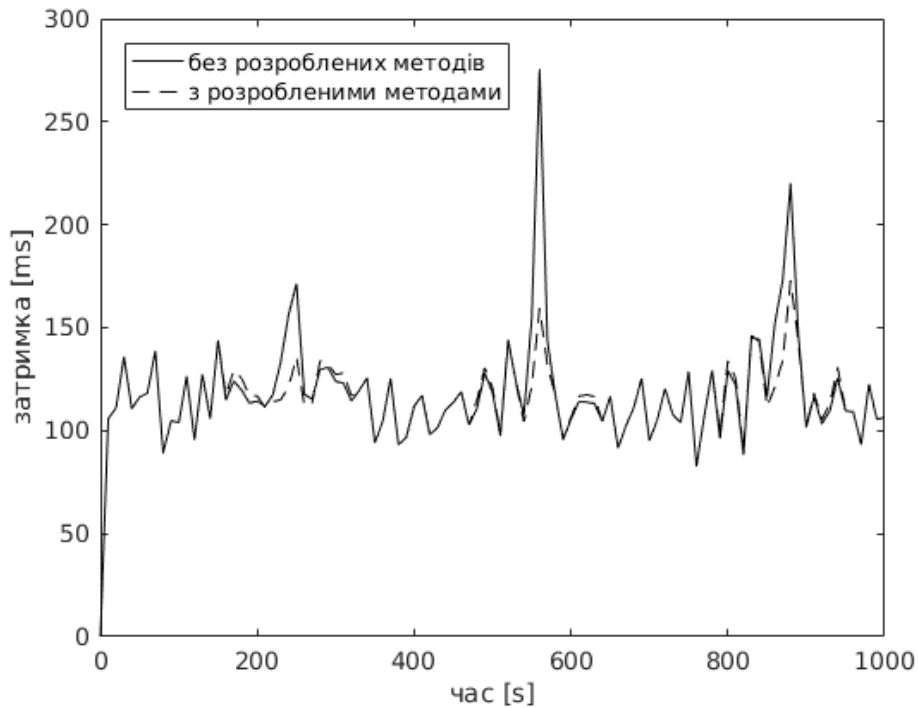


Рис. 4.28 Середня зміна джиттера в комп'ютерній мережі експерименту №2 імітаційної моделі.

Моделювання проводилось в умовах середньої інтенсивності обміну даними. В процесі моделювання було здійснено вимірювання часових затримок за доставкою пакетів до вузла `rte(1)` (див. рис.4.25, 4.26), серед яких: проводилось вимірювання часу доставки, середньої затримки передавання пакетів в комп'ютерних мережах експерименту №1 та експерименту №2, їхньої максимальної та мінімальної затримки. На основі проведеного моделювання були обчислені середні зміни джиттера протягом 1000 віртуальних секунд, що показано на Рис. 4.27-4.28 у вигляді графіків.

Рисунок 4.25 відповідає топології експерименту 1, а рис 4.26 – топології експерименту 2. На рисунках 4.27 та 4.28 відповідно суцільною лінією зображено середню зміну джиттера без застосування розроблених методів, а пунктирною лінією – зі застосуванням розроблених методів. Мінімізація значень джиттера отримана за рахунок застосування методу перерозподілу трафіку, який отримує прогнозовані значення інтенсивностей пульсацій потоку даних.

Результати моделювання параметрів комп'ютерної мережі для експерименту № 1 та 2 наведені в таблиці 4.7 та 4.8 відповідно.

**Значення затримок передавання пакетів в комп'ютерній мережі  
(Експеримент№1)**

Таблиця 4.7

Назва затримки	Назва параметра		
	Значення параметра $P_{ai}$ (без прогнозування)	Значення параметра $P_{bi}$ (з прогнозуванням)	Відносний коефіцієнт зміни $K_i$
Середня затримка передавання пакетів, ms	145,5	124,5	14.43
Середньоквадратичне відхилення	48	44,5	7.29
Максимальна затримка, ms	420,5	360,5	14.27
Мінімальна затримка, ms	35,5	34,5	2.81

**Значення затримок передавання пакетів в комп'ютерній мережі  
(Експеримент№2)**

Таблиця 4.8

Назва затримки	Назва параметра		
	Значення параметра $P_{ai}$ (без прогнозування)	Значення параметра $P_{bi}$ (з прогнозуванням)	Відносний коефіцієнт зміни $K_i$
Середня затримка передавання пакетів, ms	145,5	127	12.71
Середньоквадратичне відхилення	48	45,5	5.21
Максимальна затримка, ms	430	345	19.77
Мінімальна затримка, ms	37	35,5	4.05

У таблицях 4.7 та 4.8 значення відносного коефіцієнту зміни обчислюється за формулою (4.7.) (де  $i$  - кількість значення для обчислення відповідного  $K$ ):

$$K_i = \frac{Pa_i - Pb_i}{Pa_i} \times 100\% \quad (4.7)$$

Загалом було проведено 40 різних експериментів. Частину отриманих результатів показано на рис. 4.29 – 4.30.

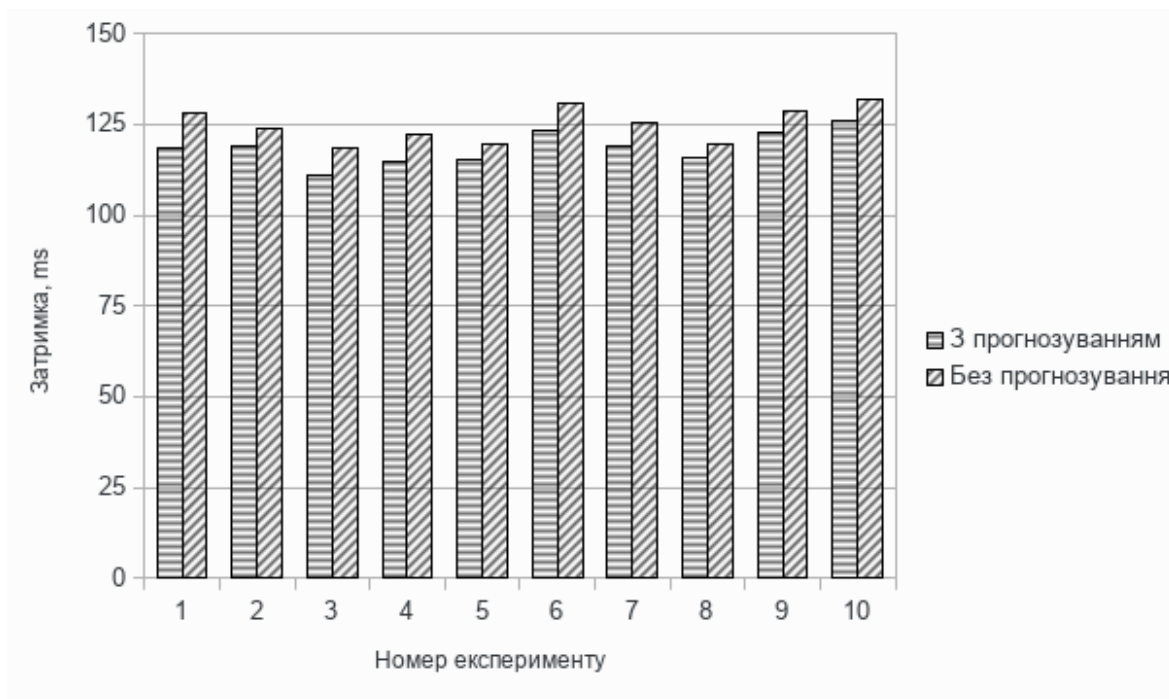


Рис. 4.29 Середня затримка пакетів для множини експериментів для топології №1

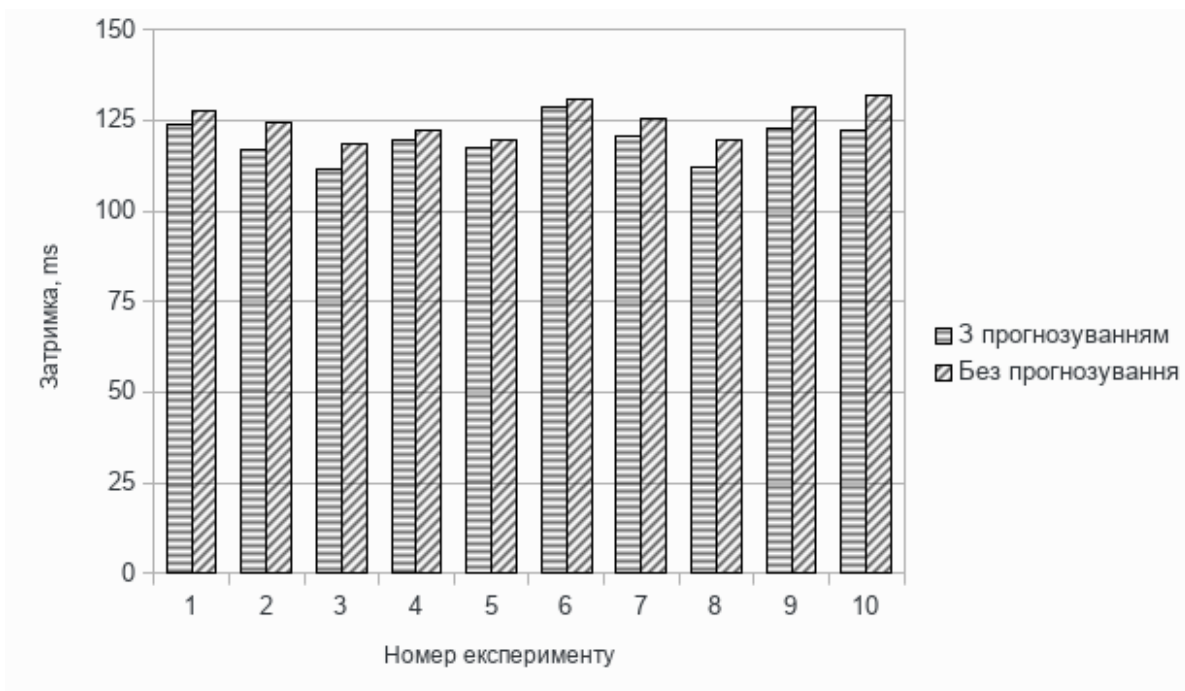


Рис. 4.30 Середня затримка пакетів для множини експериментів для топології №2

Ці результати показують адекватність проведених експериментів та обраних вибірок даних і параметрів комп'ютерної мережі.

Одним з висновків імітаційного моделювання є зменшення часу перебування пакету в системі при зменшенні завантаження мережного обладнання, маршрутизатора чи шлюзу за рахунок імплементації методу перерозподілу трафіку на основі методу короткострокового прогнозування інтенсивності трафіку даних, і при цьому час затримки знижується так само як і зменшується джиттер, подібне відбувається й зі середньоквадратичним відхиленням. Тому зменшення кількості заявок на обслуговування у вузлах, перенаправлення їх на обслуговування у менш завантажені вузли комп'ютерної мережі та використання менш завантажених каналів таких мереж є перспективним напрямком розробок для комп'ютерних мереж з метою підвищення продуктивності їх роботи та ефективнішого використання їхніх ресурсів.

З результатів моделювання можна зробити висновки, що впровадження методу короткострокового прогнозування інтенсивності трафіку даних для значень параметрів трафіку, запрограмованим на використання інформації щодо зібраних та оброблених значень параметрів трафіку на входних портах комутаційного пристрою (вузлового обладнання), створює умови для прогнозування значень таких параметрів для створення та прийняття рішень адаптивного управління, і тим самим також підвищує ефективність використання буферів вузлового обладнання та якість роботи комп'ютерної мережі.

Проведені експерименти показують покращення роботи комп'ютерної мережі за параметрами середньої затримки передавання пакетів на 12-14%, середньоквадратичного відхилення на 5-7%, максимальної затримки на 14-19%, мінімальної затримки на 2-4% (див. табл. 4.7 та 4.8).

Реалізоване комп'ютерне імітаційне моделювання показує підвищення продуктивності роботи комп'ютерної мережі на базі удосконалення перерозподілу завантаження її пристроїв.

Підсумовуючи отримані результати, загальним результатом проведених досліджень стала інформаційна технологія аналізу та прогнозування трафіку в

комп'ютерних мережах, структурно-функціональна модель якої представлена на рис. 4.31. Розроблена модель містить 8 етапів, кожен з яких відповідає конкретній частині проведеного комплексного дослідження.

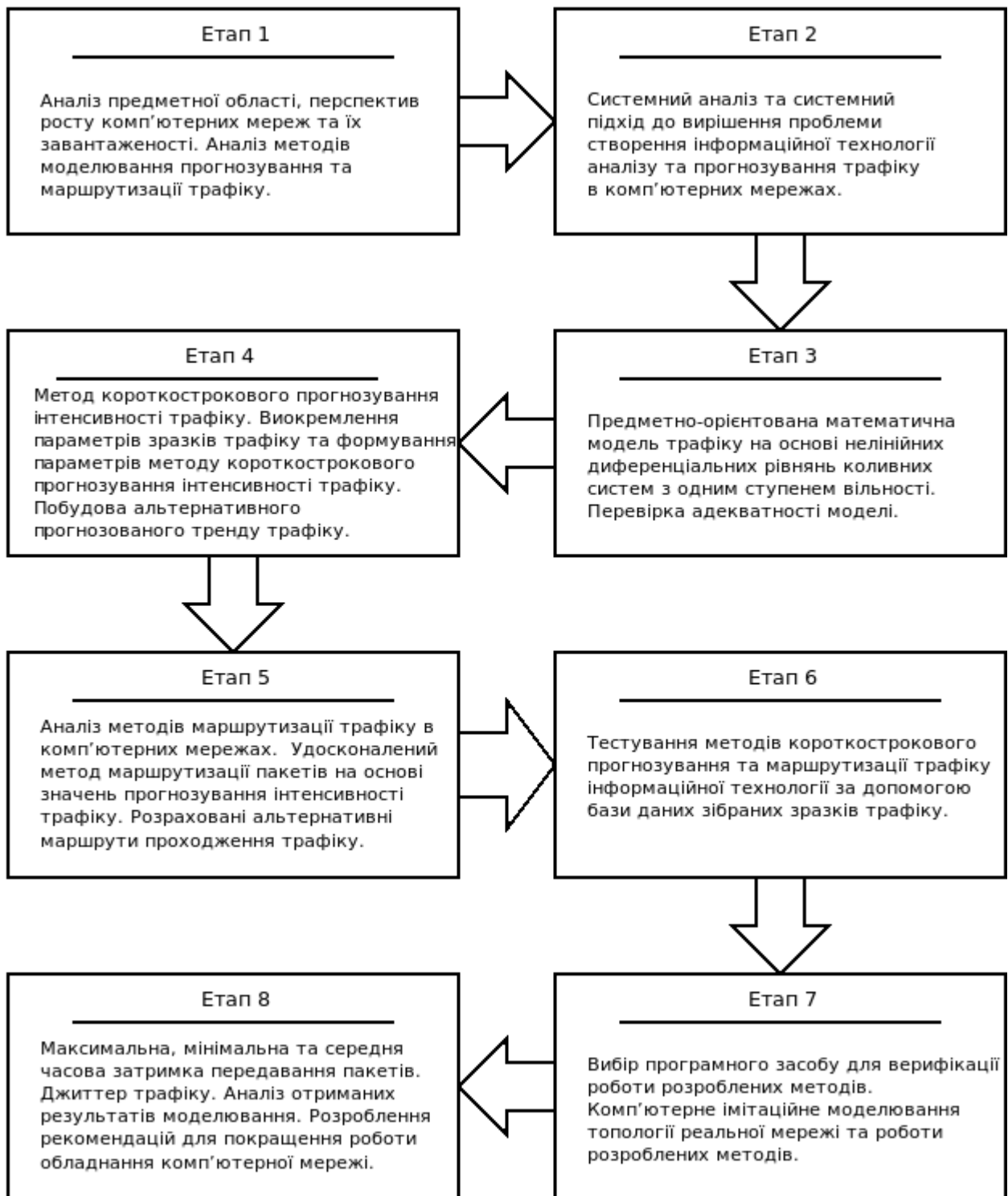


Рис. 4.31 Структурно-функціональна модель інформаційної технології аналізу та прогнозування трафіку в комп'ютерних мережах.

## Висновки до розділу 4

1. Розроблено пристрій адаптивного управління з програмним забезпеченням, яке реалізує збір та збереження даних отриманого трафіку в базі даних для аналізу трафіку в комп'ютерній мережі.

2. Уведено до складу пристрою адаптивного управління блок прогнозування параметрів трафіку, що працює згідно алгоритму, який вибирається відповідно до певних конкретних технічних умов його застосування. Він здійснює функцію вимірювання та захоплення значень параметрів трафіку, формування множин даних у певних часових інтервалах для здійснення прогнозування, а також прогнозування значень параметрів трафіку на час прийняття управлінських рішень та демонстрації результатів прогнозу на вихід пристрою виводу покращених параметрів управління.

3. Розроблено рекомендації для оптимізації роботи комп'ютерної мережі. Відповідно до запропонованого раніше методу прогнозування інтенсивності трафіку було розглянуто та досліджено зразки трафіку комп'ютерних мереж за допомогою Wireshark.

4. Підтверджено ефективність роботи методу короткострокового прогнозування інтенсивності трафіку даних, оскільки всього 10% пакетів з більшою за стандартну затримкою передавання присутні у вузлах комп'ютерної мережі, тоді як використання методу прогнозування на основі похідних дає значно гірші результати – тут таких пакетів аж 43,6%. Тобто метод короткострокового прогнозування інтенсивності трафіку даних показує кращі результати порівняно з методом прогнозування на основі похідних на 33,6% (Рис. 4.22).

5. Здійснено дослідження різних середовищ для комп'ютерного імітаційного моделювання роботи мереж та на основі проведеного аналізу обрано середовище OMNeT++.

6. У обраному середовищі розроблено тестові топології на основі даних, отриманих з проекту The Opte Project.

7. Проведено експерименти комп'ютерного імітаційного моделювання

роботи розроблених топологій мереж, які показують покращення роботи мережі за параметром зменшенням середньої зміни джиттера при використанні розроблених методів, а також параметрів середньої затримки передавання пакетів на 12-14%, середньоквадратичного відхилення на 5-7%, максимальної затримки на 14-19%, мінімальної затримки на 2-4% (див. табл. 4.7 та 4.8).

8. Розроблено структурно-функціональну модель інформаційної технології аналізу та прогнозування трафіку в комп'ютерних мережах.



## ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі на основі здійснених теоретичних та експериментальних досліджень розв'язано актуальне наукове завдання: розроблення моделі та методів прогнозування та перерозподілу трафіку з метою зменшення часових затримок передавання даних. При цьому отримано такі основні результати:

1. Проведено аналіз методів, моделей та засобів моделювання та прогнозування трафіку в комп'ютерних мережах, а також математичних моделей опису трафіку. Визначено можливості вдосконалення та розроблення таких методів, моделей та засобів, а також показано, що ці моделі та методи не надають змоги підвищити точність відображення фізичних властивостей трафіку, зокрема врахування ділянок з пульсуючим характером.

2. Показано, що побудована предметно-орієнтована математична модель трафіку на основі диференціальних рівнянь коливного руху є адекватною згідно з реальними даними трафіку. Це зумовлює використання цієї математичної моделі для підвищення точності результатів моделювання трафіку. Зокрема, проведений аналіз розв'язків рівнянь у вигляді Атеб-функцій та їхньої застосовності для моделювання трафіку комп'ютерної мережі показав, що найбільший вигравш при використанні цієї моделі можна отримати у разі прогнозування з великоамплітудними пульсуючими ділянками трафіку в порівнянні з відомими.

3. Вперше розроблено метод короткострокового прогнозування інтенсивності трафіку. Цей метод не є складним у програмній реалізації, що дає змогу застосовувати його на будь-якому мережному обладнанні у будь яких комп'ютерних мережах. На експериментально отриманих зразках трафіку здійснено короткострокове прогнозування за двома різними методами прогнозування: методом похідних та розробленим методом короткострокового прогнозування інтенсивності трафіку.

4. Вдосконалено метод маршрутизації трафіку у мережному обладнанні, який ґрунтується на прогнозуванні інтенсивностей пульсацій потоку даних та існуючих маршрутів, забезпечує корекцію маршруту передавання даних та зменшує навантаження буфера вузлового обладнання і затримку пульсацій трафіку. Із

використанням даного методу відбувається зменшення значення відносних коефіцієнтів змін для параметрів середньої затримки передавання пакетів з даними на 12-14% та максимальної затримки передавання пакетів з даними на 14-19%.

5. Здійснено програмну реалізацію розроблених методу короткострокового прогнозування інтенсивності трафіку та методу маршрутизації трафіку даних у мережному обладнанні, яка дала змогу застосовувати розроблену інформаційну технологію аналізу та прогнозування трафіку в комп'ютерних мережах на будь-якому мережному обладнанні.

6. Розроблено структурно-функціональну модель інформаційної технології аналізу та прогнозування трафіку в комп'ютерних мережах, що враховує всі етапи дослідження та уможливорює короткострокове прогнозування інтенсивності трафіку в комп'ютерних мережах.

7. Здійснено комп'ютерне імітаційне моделювання функціонування розроблених методів. Результати комп'ютерного імітаційного моделювання показали, що запропоновані методи дають змогу знизити рівень інтенсивності завантаження мережного обладнання комп'ютерної мережі.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Агеев Д.В. Параметрический синтез мультисервисных телекоммуникационных систем при передаче группового трафика с эффектом самоподобия / Д.В. Агеев // Электронное научное специализированное издание – журнал «Проблемы телекоммуникаций». – 2013 г. – № 1 (10) – С. 46-65.
2. Альомар М. Прогнозування самоподібного трафіка у пакетних мережах / М. Альомар // Управління розвитком складних систем. – 2014. – Вип. 20. – К.: КНУБА, – С. 102 – 109.
3. Бакланов И. Г. Технологии измерений в современных телекоммуникациях / Бакланов И. Г. – М. : Эко-Трендз, 1998. – 371 с.
4. Баскаков, С. И. Радиотехнические цепи и сигналы: Учеб. для вызов по спец. Радиотехника. 2-е изд. Перераб. и доп. – М. : Высш. шк., 1998. - 448 с.
5. Бессараб В.І. Генератор самоподібного трафіку для моделей інформаційних мереж / В.І. Бессараб, Е.Г. Ігнатенко, В.В. Червінський // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Обчислювальна техніка та автоматизація. Випуск 15 (130). – Донецьк-2008. – 214 с. С. 23-29.
6. Быков Д.В. Разработка внутреннего протокола маршрутизации / Д.В. Быков, В.С. Лукьянов // Информационные технологии моделирования и управления. – 2007. - № 1 (35). – С. 100-105.
7. Бігун Я.Й. Існування розв'язку та усереднення багатоточкових крайових задач для багаточастотних систем із лінійно перетвореним аргументом / Я.Й. Бігун // Нелінійні коливання. – 2008. – Т. 11, № 4. – С. 462 – 471.
8. Бігун Я.Й. Усереднення в багаточастотних системах диференціально-функціональних рівнянь. – Рукопис. – Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук: спец. 01.01.02 – диференціальні рівняння. / Бігун Ярослав Йосипович. – Київ, 2009. – 298 с.
9. Богданова Н.В. Метод та способи підвищення ефективності управління телекомунікаційними мережами: Автореф. дис. кандидата техн. наук: спец.

- 05.12.02 / Н.В. Богданова // Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій. – К. 2008. – 20 с.
10. Боголюбов Н. Н. Асимптотические методы в теории нелинейных колебаний / Н. Н. Боголюбов, Ю. А. Митропольский. — М. : Наука, 1974. — 503 с.
11. Бочаров П.П. Теория массового обслуживания. / П.П. Бочаров, А.В. Печинкин. — М.: РУДН, 1995. — С. 530., ил.
12. Будкова Л. В. Моделювання самоподібного трафіка в інформаційних телекомунікаційних мережах / Л. В. Будкова, В. І. Корнієнко // Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського, 2013 р. — Вип. 4. — С. 46-52.
13. Буров Є.В. Комп'ютерні мережі : 2-ге оновл. і доп. вид. / Є.Буров;. — Л. : БаК, 2003. — 584 с.
14. Вимоги, що пред'являються до сучасних обчислювальних мереж. [Електронний ресурс]. — Доступний з <http://matveev.kiev.ua/archnet/glava1/006.htm>.
15. Войчишин К. С. Пример образования периодически коррелированных случайных процессов / К.С. Войчишин, Я.П. Драган // Радиотехника и электроника. —1973. —18, № 9. — С. 1957 - 1960.
16. Гребеников Е. А. Метод усреднения в прикладных задачах. / Е.А. Гребеников. — М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1986. — 256 с.
17. Грыцьк В.В. Математичні моделі алгоритмів і реалізація Ateb-функцій. / В.В. Грыцьк, М.А. Назаркевич // – Доповіді НАН України, Сер. А, 2007, № 12. С. 37 – 43.
18. Демида Б.А. Основи адміністрування LAN у середовищі MS Windows: навч. посіб. / Б.А. Демида, К.М. Обельовська, В.С. Яковина. – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2013. – 488 с.
19. Дронюк І. М. Ідентифікація захищених електронних та поліграфічних документів на основі теорії Ateb-функцій / І. М. Дронюк, М. А. Назаркевич // Комп'ютерні науки та інформаційні технології : матеріали 4-ї Міжнар.наук.-

- техн. конф. CSIT 2009, 15-17 жовт. 2009, Львів, Україна / Нац. ун-т «Львів. політехніка», Ін-т комп'ют. наук та інформ. технологій. – Л., 2009. – С.63-66.
20. Дронюк І. М. Аналіз трафіку комп'ютерної мережі на основі експериментальних даних середовища Wireshark / Дронюк І. М., Федевич О. Ю. // Вісник Нац. ун-ту "Львівська політехніка". – 2015. – № 814 : Інформаційні системи та мережі. – С. 55–62.
21. Дронюк І.М. Дослідження періодичних коливних процесів шляхом розкладів Атеб-функцій у числові ряди Тейлора та Фур'є / І. Дронюк, М. Назаркевич, М. Дронюк // Комп'ютерні науки та інформаційні технології : [зб. наук. пр.] / відп. ред. Ю. М. Рашкевич. — Л. : Вид-во Львів. політехніки, 2010. — С.198-203. — (Вісник / Нац. ун-т «Львів. політехніка» ; № 663).
22. Дронюк І.М. Аналізатор трафіку потоку з вбудованим модифікованим алгоритмом маршрутизації / Дронюк І.М., Федевич О.Ю. // Матеріали XII міжнародної наукової конференції «Інтелектуальні системи прийняття рішень та проблеми обчислювального інтелекту» (ISDMCI 2016) Залізний порт. — 2016. — С.61 — 63.
23. Дронюк І.М. Моніторинг та аналіз реального та модельного трафіку комп'ютерної мережі / Дронюк І.М., Федевич О.Ю. // В зб.наукових праць Інституту проблем моделювання в енергетиці ім.Г.Є.Пухова. Вип.74 К. – 2015. – С.74-81.
24. Дронюк І.М. Прогнозування трафіку комп'ютерних мереж для підвищення ефективності використання мережевого обладнання / Дронюк І.М., Федевич О.Ю. // Наук. вісн. НЛТУ України. – 2015. – Вип.25.5. – С.301-307.
25. Дронюк І.М. Програмний комплекс моніторингу та прогнозування трафіку потоку в сегменті комп'ютерної мережі / Дронюк І.М., Федевич О.Ю. // Наук. вісн. НЛТУ України.-2015. – Вип.25.10. – С.295-301.
26. Дронюк І.М. Аналіз трафіку на основі даних програмного забезпечення Wireshark / Дронюк І.М., Федевич О.Ю., Кордяк В.І. // Матеріали міжнародної наукової конференції «Інтелектуальні системи прийняття рішень та проблеми

- обчислювального інтелекту» (ISDMCI 2015). – Херсон, видавництво ХНТУ, 2015. – С. 56-59.
27. Дронюк І.М. Оптимізація роботи комп'ютерних мереж за критерієм ефективного використання вузлового обладнання / Дронюк І.М., Федевич О.Ю., Труняк М.С. // Матеріали VI-ї Всеукраїнської науково-практичної конференції «Сучасні інформаційні технології в економіці, менеджменті та освіті» (СІТЕМ 2015) Львів. — 2015. — С.63 — 66.
28. ДСТУ В 3265 – 95. Зв'язок військовий. Терміни та визначення. – К.:УкрНДІССІ, 1995. – 23 с
29. Дымарский Я.С. Управление сетями связи: принципы, протоколы, прикладные задачи / Я.С. Дымарский., Н.П. Крутякова, Г.Г. Яновский. – М.: ЭкоТрендз, 2003. – 384 с.
30. Дынкин Е.Б. Марковские процессы / Е.Б. Дынкин. – Е.Б.М.: Физматлит, 1963. – 860 с.
31. Жожикашвили В. А. Сети массового обслуживания. Теория и применение к сетям ЭВМ / В.А. Жожикашвили, Вишневский В.М. – М.: Радио и связь, 1988 г., 192 с.
32. Заболотнов Ю.М. Применение метода усреднения для построения оптимального управления колебательными системами. / Ю.М. Заболотнов // Электронный ресурс. – Режим доступа [http://www.ssc.smr.ru/media/ipuss\\_conf/14/6\\_17.pdf](http://www.ssc.smr.ru/media/ipuss_conf/14/6_17.pdf)
33. Зюльков И.А. Самоподобные свойства трафика систем с повторными вызовами / И.А. Зюльков // Вестник ВГУ, Серия Физика, Математика, 2002 г., № 1. – С. 20-26.
34. Ильницький С.В. Работа сетевого сервера при самоподобной (self-similar) нагрузке / С.В. Ильницький // Электронный ресурс. – Режим доступа: <http://314159.ru/ilnickis/ilnickis1.pdf>
35. Климаш М.М. Система управління сучасними телекомунікаційними мережами [Текст] : монографія / В. Г. Кривуца [та ін.] ; Державна адміністрація зв'язку,

- Державний ун-т інформаційно-комунікаційних технологій. – К. : ДУІКТ, 2009. – 268 с.
36. Князев А.В. Применение метода усреднения для исследования автоколебаний систем высокого порядка / А.В. Князев // Автомат. и телемех., 1982, № 6. – С.171–173.
37. Кордяк В.І. Інформаційна технологія моніторингу та аналізу трафіку у комп'ютерних мережах / В.І. Кордяк, І. М. Дронюк, О.Ю. Федевич // Вісник Нац. ун-ту "Львівська політехніка". – 2015. – № 826 : Комп'ютерні науки та інформаційні технології. – С. 35–42.
38. Кордяк В.І. Аналізатор роботи комп'ютерної мережі на базі QT framework / Кордяк В.І., Федевич О.Ю. // Матеріали п'ятої науково-практичної конференції FOSS Lviv. – 2015. – С.55-56.
39. Костромицкий А. И. Подходы к моделированию самоподобного трафика / А. И. Костромицкий, В. С. Волоotka // Вост.-Европ. журн. передовых технологий. - 2010. - № 4/7. - С. 46-49. - Библиогр.: 16 назв. - рус.
40. Кошляков В. Н. Метод усреднения в проблеме устойчивости движения твердого тела, подвешенного на струне / В. Н. Кошляков // Укр. мат. журн. - 2007. - 59, № 4. - С. 467-475. - Библиогр.: 18 назв. - рус.
41. Крюков Ю.А. Исследование самоподобия трафика высокоскоростного канала передачи пакетных данных / Ю.А. Крюков, Д.В. Чернягин // III Международная научная конференция «Современные проблемы информатизации в системах моделирования, программирования и телекоммуникациях». Электронный ресурс. – Режим доступа: <http://econf.rae.ru/article/4819>.
42. Кулаков Ю.О. Комп'ютерні мережі: підруч. / за ред. Ю.С. Ковтанюка / Ю.О. Кулаков, Г.М. Луцький. – К.: Видавництво «Юніор», 2005. – 400с., іл.
43. Кучук Г.А. Анализ та моделі самоподібного трафіка / Г.А. Кучук, О.О. Можаяев, О.В. Воробйов // Авиационно-космическая техника и технология. – 2006. – № 9 (35). – С. 173-180.
44. Муранов О.С. Дослідження впливу механізму прогнозування трафіку на якість

- системи адаптивного керування комутатором / О.С. Муранов, Ю.А. Кочергін, В.М. Чуприн // Проблеми інформатизації та управління : Зб. наук. праць НАУ. – К. : НАУ, 2009. – Випуск 1 (25). – С.137-143.
- 45.Муранов О.С. Експериментальні дослідження механізмів прогнозування пульсацій пакетного трафіку / О.С. Муранов // Защита информации : сб. науч. трудов Национального авиационного университета. – К. : Изд-во НАУ, 2008. – Специальный выпуск. – С. 137-142.
- 46.Муранов О.С. Метод динамічного перерозподілу продуктивності пакетного комутатора між його портами з використанням механізму прогнозування пульсацій трафіку / О.С. Муранов, В.М. Чуприн, В.Г. Потапов // Проблеми інформатизації та управління : Зб. наук. праць. – К. : НАУ, 2008. – № 2 (24). – С.136-144.
- 47.Назаркевич М.А. Методи підвищення ефективності поліграфічного захисту засобами Атеb-функцій: монографія / М.А. Назаркевич. – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2011. – 188 с.
- 48.Обельовська К.М. Модифікований алгоритм маршрутизації для зменшення перевантажень ресурсів комп'ютерних мереж / К.М. Обельовська, А.М. Русаков // Вісник НУ «Львівська політехніка» № 663 «Комп'ютерні науки та інформаційні технології». Львів, 2010. – с. 223-228.
- 49.Обельовська К.М. Модифікований алгоритм маршрутизації для врахування завантаженості каналів комп'ютерних мереж / К.М. Обельовська, А.М. Русаков // Науково-публіцистичний часопис «Технічні вісті», № 2010 / 1(31), 2(32). Львів, 2010. – с. 42-43.
- 50.Олифер В.Г. Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы: Учебник для вузов. 4-е изд. / В.Г. Олифер, Н.А. Олифер. – СПб: Питер, 2010. – 944 с.
- 51.Пат. 106989 Україна, МПК:Н04L 12/02, Н03Н 21/00 Пристрій для адаптивного управління трафіком потоку в сегменті комп'ютерної мережі / І.М. Дронюк, О.Ю. Федевич; власник Нац. ун-т «Львів. політехніка». – № 201512669 ; заявл. 21.12.2015; опублік. 10.05.2016, Бюл. № 9. – 2 с.



52. Пат. 43630 Україна, МПК: H04L 12/00, H04B 7/005 Вузол керування комутаційним пристроєм / О.С. Муранов, О.П. Ткаліч, Ю.А. Кочергін; власник Нац. авіаційний ун-т України. – № 2000105737 ; заявл. 25.03.2009 ; опублік. 25.08.2009, Бюл. № 16. – 2 с.
53. Петришин Р.І. Усереднення крайової задачі для багаточастотної системи з відхиленням аргументом / Р.І. Петришин, І.М. Данилюк // Нелінійні коливання. — 2007. — Т.10, №4. — С.519 – 527.
54. Петров В.В., Платов В.В. Исследование самоподобной структуры телетрафика беспроводной сети / В.В. Петров, В.В. Платов // Радиотехнические тетради. — 2004. — № 30. – С. 58-62.
55. Петров М. Н. Самоподобие в системах массового обслуживания с ограниченным буфером / М. Н. Петров, Д. Ю. Пономарев // Электросвязь. – 2002. – №2. – С. 35.
56. Привалов А.Ю., Баева М.В. Моделирование самоподобного трафика / А.Ю. Привалов, М.В. Баева // Известия Самарского научного центра Российской академии наук, т. 8, №4, 2006 г. – С. 1041-1046.
57. Радивилова Т.А. Анализ продуктивности сети в условиях самоподобной нагрузки / Т.А. Радивилова // Збірник наукових праць «Системи обробки інформації» Випуск 7 (105), 2005 р. – С. 211-215.
58. Сайко А.П. О применении усреднения Крылова–Боголюбова–Митропольского к построению эффективных гамильтонианов в теории сильно коррелированных электронных систем / А. П. Сайко // ТМФ, 161:2 (2009). – С. 287–294.
59. Самойленко А. М. Свойства периодических Атеб-функций и их применение при построении решений нелинейных дифференциальных уравнений второго порядка [Препринт 84.20] / А. М. Самойленко, А. М. Возний. – К.: Институт математики АН УССР, 1984. — 51 с.
60. Седжвик Р. Фундаментальные алгоритмы на C++. Часть 5. Алгоритмы на графах / Седжвик Р. – К.: Диасофт, 2004.

61. Семкин С.В. Использование метода усреднения по полям взаимодействия для построения ренормгруппового преобразования фиксированного масштаба / С.В. Семкин, В.П. Смагин // Физика твердого тела, 2013, том 55, вып. 5, 05,11. – С. 892-895.
62. Сеник П. М. Про Ateb-функції / П. М. Сеник. // Докл. АН УРСР, сер. А. — 1968. — № 1. — С. 23–27.
63. Сеник П.М. Обернення неповної Beta-функції / П.М. Сеник // Український математичний журнал. – 1969. – № 3. – С. 325-333.
64. Сокирка Є.О. Моделювання ІКМ підприємства з балансуванням навантаження / Є.О. Сокирка // Захист інформації в інформаційно-комунікаційних системах : матер. наук.-практ. конф., 3-6 червня 2013 р. – К. : Вид-во НАУ. – С. 29-30.
65. Сокол Б. И. Асимптотические приближения решения для одного нелинейного неавтономного уравнения [Текст] / Б. И. Сокол. // Укр. мат.
66. Стеклов В. К. Оптимізація та моделювання пристроїв і систем зв'язку : підручник; під ред. В. К. Стеклова / Стеклов В. К., Беркман Л. Н., Кільчицький Є. В. – К. : Техніка, 2004. – 576 с.
67. Стрихалюк Б.М. Моделювання та тестування системи управління гетерогенної мережі доступу [Електронний ресурс] / Б. М. Стрихалюк, М. І. Бешлей, Г. В. Холявка, М. В. Брич // Телекомунікаційні та інформаційні технології. - 2015. - № 1. - С. 22-31. - Режим доступу: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/vduikt\\_2015\\_1\\_6](http://nbuv.gov.ua/UJRN/vduikt_2015_1_6)
68. Таненбаум Э. Компьютерные сети / Эндрю Таненбаум; пер. с англ. А. Леонтьев. – СПб.: Питер, 2002. — 848 с..
69. Тихонов В.И. Марковские процессы / В.И. Тихонов, М.А. Миронов. – М.: Советское радио, 1977. – 488с.
70. Федевич О. Дослідження трафіку комп'ютерних мереж засобами аналізатора мережевих протоколів // Збірник тез доповідей підсекції «Інформаційні управляючі системи і технології» 72-ої науково-технічної студентської конференції. – Львів. – 2014. – С. 142-144.

- 71.Федевич О.Ю. Аналізатор протоколів комп'ютерної мережі для оптимізації адаптивного управління трафіком потоку // Наук. вісн. НЛТУ України. – 2016. – Вип. 26.03. – С.374-380.
- 72.Федевич О.Ю. Програмне забезпечення для аналізу протоколів комп'ютерної мережі для ОС Ubuntu / О.Ю. Федевич // Матеріали шостої міжнародної конференції FOSS Lviv 2016, 19-22 квітня 2016 року. – С.22-23.
- 73.Федорова М.Л. Об исследовании свойства самоподобия трафика мультисервисной сети / М. Л. Федорова, Т. М. Леденева // Вестник ВГУ. Серия: Системный анализ и информационные технологии 2010 г, №1. – С. 46-54.
- 74.Цыбаков Б.С. Модель телетрафика на основе самоподобного случайного процесса / Б.С. Цыбаков // «Радиотехника», №5, 1999 г. – С. 24-31.
- 75.Atmaca T. A model of boot-up storm dynamics / T. Atmaca, T. Czachórski, K. Grochla, T. Nycz T, F. Pekergin // Proceeding of 27th International Symposium of Computer and Information Sciences, 2013. – Brenna, Poland. – P. 371-379.
- 76.Awrejcewicz, J. Oscillations of non-linear system with restoring force close to sign (X) / J. Awrejcewicz, I. Andrianov // J. Sound Vibr. – 2002. –Vol. 252(5), pp. 962–966 (2002).
- 77.Che Soong Kim Tandem retrial queueing system with correlated arrival flow and operation of the second station described by a Markov chain / Kim Che Soong, A. Dudin, V. Klimenok // Proceeding of 19th International Conference CN 2012. – Szczyrk, Poland. – 2012. – P. 370-382.
- 78.Cherkassky B.V., Goldberg A.V., Radzik T. Shortest paths algorithms: theory and experimental evaluation / B.V. Cherkassky, A.V. Goldberg, T. Radzik // Mathematical Programming Vol.73. – 1996. – pp. 74-129.
- 79.Cisco VNI Forecast Widget. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.cisco.com>
- 80.Czachórski T. Transient states of priority queues – a diffusion approximation study / T. Czachórski, T. Nycz, F. Pekergin // International Journal On Advances in Networks and Services. – 2009. – Vol. 2, No. 2 and 3. – Pp. 205-217.

81. Czachórski T. Performance Evaluation of a Multiuser Interactive Networking System: A Comparison of Modelling Methods / T. Czachórski, K. Grochla, A. Jozefiok, T. Nycz, F. Pekergin // Proceeding of 26th International Symposium on Computer and Information Sciences (ISCIS 2011). – London, UK. – 2011. – P. 215-221.
82. Czachórski T. Diffusion approximation model for the distribution of packet travel time at sensor networks / T. Czachórski, K. Grochla, F. Pekergin // In proceeding of Wireless Systems and Mobility in Next Generation Internet, 4th International Workshop of the EuroNGI/EuroFGI Network of Excellence. – Barcelona, Spain. – 2008. – P. 10-25.
83. Czachórski T. Queue with limited volume, a diffusion approximation approach / T. Czachórski, T. Nycz, F. Pekergin // Proceedings of the 25th International Symposium on Computer and Information Sciences. – London, UK. – 2010. – P. 71-74.
84. Czachorski T. Transient states analysis - diffusion approximation as an alternative to Markov models, fluid-flow approximation and simulation / T. Czachorski, T. Nycz, F. Pekergin // Proceedings of the 14th IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC 2009). – Sousse, Tunisia. – 2009. – P. 13-18.
85. Czachórski T. Transient states of priority queues – a diffusion approximation study / T. Czachórski, T. Nycz, F. Pekergin // International Journal On Advances in Networks and Services, vol. 2, no. 2 and 3, 2009. – P. 205-217.
86. Czachórski T. A tool to model network transient states with the use of diffusion approximation / T. Czachórski, M. Pastuszka, F. Pekergin // Proceeding of Computer Performance Evaluation: Modelling Techniques and Tools, 10th International Conference, Tools '98. – Palma de Mallorca, Spain. – 1998. – P. 344-347.
87. Czachórski T. A diffusion approximation model of an electronic-optical node / T. Czachórski, F. Pekergin // LNCS, Formal Techniques for Computer Systems and Business Proesses, no. 3670, 2005. – P. 187-199.

88. Czachórski T. Diffusion Approximation as a Modelling Tool / T. Czachórski, F. Pekergin // chapter in: Network Performance Engineering, A Handbook on Convergent Multi-Service Networks and Next Generation Internet, June, 2011. – P. 447-476.
89. DARPA/NSF. The network simulator – ns-2 [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>.
90. Dijkstra E.W. A note on two problems in connexion with graphs / E.W. Dijkstra // Numerische Mathematik, Vol. 1., 1959. – Pp. 269 - 271.
91. Di P. Towards Comparable Network Simulations / P. Di, Y. Hourii, K. Kutzner, T. Fuhrmann // Technical Report 2008-9, ISSN 1432-7864, Dept. of Computer Science, Universität Karlsruhe (TH). – 2008.
92. Domańska J. Internet Traffic Source Based on Hidden Markov Model / J. Domańska, A. Domański, T. Czachórski // NEW2AN, volume 6869 of Lecture Notes in Computer Science, Springer. – 2011. – P. 395-404.
93. Droniuk I. Ateb-prediction Simulation of Traffic Using OMNeT++ Modeling Tools / I.M. Droniuk, O. Yu. Fedevych, P. Lipinski // Proceedings of the 10-th International Scientific and Technical Conference «Computer Science and Information Technologies» (CSIT 2016) Lviv. – 2016. – P. 96 - 98.
94. Droniuk I. Computer network protocol analyzer designed for accuracy of traffic trends forecasting / Droniuk I., Fedevych O. // Матеріали XII Міжнародної науково-технічної конференції «Перспективні технології і методи проектування МЕМС» (MEMSTECH 2016) Львів-Поляна. — 2016. — С. 155 – 157.
95. Droniuk I. Construction of Noise-like signals Based on Ateb – Functions / Droniuk I., Fedevych O. // Матеріали XIII Міжнародної науково-технічної конференції «Досвід розробки і застосування САПР в мікроелектроніці» (CADSM 2015). — Львів-Поляна. – 2015. — С. 42 – 44.
96. Droniuk I. Forecasting of the trend of traffic based on Ateb-functions theory / Droniuk I., Fedevych O. // Proceedings of the 10-th International Scientific and

- Technical Conference «Computer Science and Information Technologies» (CSIT 2015) Lviv. – 2015. – P.139 - 141.
97. Droniuk I. Modeling the Small Perturbation in Vibration Systems Based on Ateb – Functions / Droniuk I., Fedevych O. // *Матеріали дев'ятої Міжнародної науково-технічної конференції «Перспективні технології і методи проектування MEMC» (MEMSTECH 2013).* — Львів-Поляна. – 2013. — С. 100 – 103.
98. Droniuk I. Investigation of Computer Network Traffic Using Network Protocol Analyzer // Droniuk I., Fedevych O. // *Матеріали десятої Міжнародної науково-технічної конференції «Перспективні технології і методи проектування MEMC» (MEMSTECH 2014).* — Львів. – 2014. — С. 74.
99. Dronjuk I. Asymptotic method of traffic simulation. Distributed Computer and Communication Networks / Dronjuk I., Nazarkevych M., Fedevych O. // *Communications in Computer and Information Science.* – Springer 2014, Vol. 279. – pp.136-144.
100. Dronyuk I. Synthesis of noise-like signals based on Ateb-functions / Dronyuk I., Nazarkevych M., Fedevych O. // *Communications in Computer and Information Science: Revised Selected Papers, Springer International Publishing Switzerland Vol.601.* – 2016. – pp.132-140.
101. Dronyuk I. Synthesis of noise-like signals based on Ateb-functions / Dronyuk I., Nazarkevych M., Fedevych O. // *In Proceedings of The 18-th International Conference on Distributed Computer and Communication Networks: Control, Computation, Communications (DCCN-2015).* Moscow: JSC "TECHNOSPHERA". – 2015. – P.223-232.
102. Dudin A. Algorithmic analysis of dual tandem queue with batch Markovian arrival process and repeated attempts at the first station / Dudin A., Klimenok V. // *Proceeding of 17th International Conference DCCN 2013.* – Moscow, Russia. – 2013. – P. 190-203.
103. Dudin A. Investigation of queueing system suitable for mathematical modelling of TCP short transfer / Dudin A., Klimenok V. // *Proceeding of 5th*

- International Workshop, MACOM 2012. – Maynooth, Ireland. – 2012. – P. 122-133.
104. Dudin A. Multidimensional asymptotically quasi-Toeplitz Markov chains and their application in queueing theory / Dudin A., Klimenok V. // *Queueing Systems* vol. 54, Issue 4, 01/2006, 54(4). – P. 245-259.
105. Dudin A. Multi-dimensional quasitoeplitz Markov chains / Dudin A., Klimenok V. // *Journal of Applied Mathematics and Stochastic Analysis* 01/1999. – P. 393-415.
106. Dudin A. Tandem queueing system with correlated input and cross-traffic / Dudin A., Klimenok V. Vishnevsky V. // *Proceeding of 20th International Conference CN 2013*. – Lwówek Śląski, Poland. – 2013. – P. 416-425.
107. Fedevych O. Monitoring and analysis of measured and modeled traffic of TCP/IP Networks / Fedevych O., Droniuk I., Nazarkevych M. // *Communications in Computer and Information Science, Springer International Publishing Switzerland* Vol. 608. – 2016. – p.32-41.
108. Foremski P. “Mutrics: Multilevel traffic classification” [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://mutrics.iitis.pl/>
109. Hansen N. The extremal behaviour over regenerative cycles for Markov additive processes with heavy tails / Hansen N., Jensen A. // *Stochastic Processes and their Applications*, vol. no.115, Issue 4. – 2005. – P. 579–591.
110. IEEE 802.3x LAN/MAN Standards Committee. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ieee802.org/>
111. Kim C. Multi-server queueing system with a batch Markovian arrival process and negative customers / Kim C., Klimenok V., Orlovskii D. // *Automation & Remote Control*, Vol. 67 Issue 12. – 2006. – P. 1958-1973.
112. Klymash M. The Calculation of City Synchronous Network Reliability Parameters / Klymash M., Burachok R. // *The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics: Proceeding of the VI-th International Conference CADSM 2001*. Lviv Polytechnic National University. – Lviv-Slavske. – 2001. – P. 234-236.

113. Lessmann J. Comparative Study of Wireless Network Simulators / J. Lessmann, P. Janacik, L. Lachev, D. Orfanus // Proceedings of the Seventh International Conference on Networking. IEEE Computer Society, Washington, DC. – 2008. – Pp.517-523.
114. Louzada V. H. P. How to suppress undesired synchronization / Louzada V. H. P., Araújo N. A. M., Andrade Jr. J. S., and Herrmann H. J. // Scientific Reports 2, 658 (2012).
115. Medykovskyy M. Modelling the Perturbation of Traffic Based on Ateb-functions / I. Droniuk, M. Nazarkevich, O. Fedevych // Communications in Computer and Information Science. – 2013. – Vol. 370, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2013, pp.38-44.
116. Nurminen J.N. Using software complexity measures to analyze algorithms - an experiment with the shortest-paths algorithms / Nurminen J.N. // In Computers & Operations Research. Elsevier Science. – 2003. – pp 1121-1134.
117. Nycz M. An analysis of the extracted parts of Opte Internet topology / Nycz M., Nycz T., Czachórski T. // Communications in Computer and Information Science 2015, Springer International Publishing Switzerland, Vol.522. – 2015. – P. 371-381.
118. Nycz M. Modelling dynamics of TCP flows in very large network topologies / Nycz M., Nycz T., Czachórski T. // Information Sciences and Systems 2015, Springer International Publishing Switzerland, V.363, Part V. – 2016. – P. 251-259.
119. Nycz T. A Numerical Comparison of Diffusion and Fluid-Flow Approximations Used in Modelling Transient States of TCP/IP Networks / Nycz T., Nycz M., Czachórski T. // 21st International Conference CN 2014. – Brunów, Poland. – 2014. – pp. 213-222.
120. OMNeT++ Community Site. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.omnetpp.org> .
121. Orfanus D. Performance of wireless network simulators: a case study / D. Orfanus, J. Lessmann, P. Janacik, L. Lachev // Proceedings of the 3rd ACM Workshop on Performance Monitoring and Measurement of Heterogeneous



- Wireless and Wired Networks, PM2HW2N 2008. – Vancouver, British Columbia, Canada. – 2008. – P.59-66.
122. Rahman M.A. A Comparison of Models Designed using Different Kinds of Network Simulation Tools / M.A. Rahman, A. Pakstas, F.Z. Wang // PGNET 2007. – Liverpool, UK. – 2007. – p. 1-6.
123. Rahman M.A. Network modelling and simulation tools / M.A. Rahman, A. Pakstas, F.Z. Wang // Simulation Modelling Practice and Theory. - 2009. - 17(6). - P.1011-1031.
124. Sobeih A. J-Sim: An Integrated Environment for Simulation and Model Checking of Network Protocols / A. Sobeih, M. Viswanathan, D. Marinov, J.C. Hou // Proceedings of the Parallel and Distributed Processing Symposium, Long Beach, CA, 2007. – P.1-6.
125. Szcześniak I. Preliminary results of packet loss analysis in optical packet-switched networks with limited deflection routing / I. Szcześniak, J.-M. Fourneau, T. Czachórski // Proceeding of SAINT 2005 Workshops. – Trento, Italy. 2005. – P. 296-299.
126. Szcześniak I. Approximate analytical performance evaluation of synchronous bufferless optical packet-switched networks / I. Szcześniak, B. Mukherjee, T. Czachórski // Journal of Optical Communications and Networking, no. 3(10). – 2011. – P. 806-815.
127. The Opte Project, The Internet 2015, [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.opte.org/the-internet/>.
128. Varga A. Ommet++ – discrete event simulation system. / A. Varga // Proceedings of the European Simulation Multiconference. – 2001.
129. Vuillemot R. A web-based interface to design information visualization / Vuillemot R., Rumpler B. // In proceedings of International ACM Conference on Management of Emergent Digital EcoSystems. – Lyon, France. – 2009. – P.172-179.
130. Wireshark – практика перехвата. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://suli-company.org.ua/it/hack/522-wireshark-praktika-perehvata.html>.

131. Wireshark.org [Электронный ресурс]. – Режим доступа:  
<http://www.wireshark.org/docs/dfref/>.

## **Додаток 1. Список публікацій здобувача за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації**

*Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:*

1. Medykovskyy M. Modelling the Perturbation of Traffic Based on Ateb-functions / I. Droniuk, M. Nazarkevich, O. Fedevych // Communications in Computer and Information Science. - 2013. - Vol. 370, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2013, pp.38-44. (Scopus, Web of Science).
2. Dronjuk I. Asymptotic method of traffic simulation (Distributed Computer and Communication Networks) / Maria Nazarkevych, Olga Fedevych // Communications in Computer and Information Science. – 2014. – Springer 2014, Vol. 279, pp.136-144. (Scopus, Web of Science).
3. Dronyuk I. Synthesis of noise-like signals based on Ateb-functions / M. Nazarkevych, O. Fedevych // Communications in Computer and Information Science: Revised Selected Papers, Vol.601, Springer International Publishing Switzerland. - 2016. pp.132-140. (Scopus, Web of Science).
4. Fedevych O. Monitoring and analysis of measured and modeled traffic of TCP/IP Networks / Ivanna Droniuk, Maria Nazarkevych // Communications in Computer and Information Science, Vol. 608, Springer Int. Publishing Switzerland. – 2016. pp. 32-41. (Scopus, Web of Science).
5. Dronyuk I. Traffic Flows Ateb-Prediction Method with Fluctuation Modeling Using Dirac Functions / Fedevych O. // Communications in Computer and Information Science, vol 718. Springer International Publishing Switzerland. – 2017. pp. 3-13. (Scopus, Web of Science).
6. Дронюк І.М. Прогнозування трафіку комп'ютерних мереж для підвищення ефективності використання мережевого обладнання / Дронюк І.М., Федевич О.Ю. // Наук. вісн. НЛТУ України.-2015.-Вип.25.5.-С.301-307. (Index Copernicus).
7. Дронюк І.М. Програмний комплекс моніторингу та прогнозування трафіку потоку в сегменті комп'ютерної мережі / Дронюк І.М., Федевич О.Ю. // Наук. вісн. НЛТУ України.-2015.-Вип.25.10.-С.295-301. (Index Copernicus).
8. Федевич О.Ю. Аналізатор протоколів комп'ютерної мережі для оптимізації адаптивного управління трафіком потоку // Наук. вісн. НЛТУ України.-2016.-Вип. 26.03.-С.374-380. (Index Copernicus).
9. Федевич О.Ю. Застосування методу Ateb-прогнозування для зменшення інтенсивності завантаження каналів комп'ютерних мереж // Наук. вісн. НЛТУ України.-2016.-Вип. 26.08.-С.375-381. (Index Copernicus).
10. Дронюк І. М. Аналіз трафіку комп'ютерної мережі на основі експериментальних даних середовища Wireshark / Дронюк І. М., Федевич О. Ю. // Вісник Нац. ун-ту "Львівська політехніка". – 2015. – № 814 : Інформаційні системи та мережі. – С. 55–62.
11. Кордяк В.І. Інформаційна технологія моніторингу та аналізу трафіку у комп'ютерних мережах / Кордяк В.І., Дронюк І. М., Федевич О. Ю. // Вісник Нац. ун-ту

"Львівська політехніка". – 2015. – № 826 : Комп'ютерні науки та інформаційні технології. – С. 35–42.

12. Дронюк І.М. Моніторинг та аналіз реального та модельного трафіку комп'ютерної мережі / Дронюк І.М., Федевич О.Ю. // В зб.наукових праць Інституту проблем моделювання в енергетиці ім.Г.Є.Пухова. Вип.74 К.2015. – С.74-81.

*Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:*

13. Droniuk I. Modeling the Small Perturbation in Vibration Systems Based on Ateb – Functions / Droniuk I., Fedevych O. // Матеріали дев'ятої Міжнародної науково-технічної конференції «Перспективні технології і методи проектування МЕМС» (MEMSTECH 2013). — Львів-Поляна. – 2013. — С. 100 – 103. (Дати проведення: 16-20 квітня 2013 р., форма участі – заочна участь)

14. Droniuk I. Investigation of Computer Network Traffic Using Network Protocol Analyzer // Droniuk I, Fedevych O. // Матеріали десятої Міжнародної науково-технічної конференції «Перспективні технології і методи проектування МЕМС» (MEMSTECH 2014). — Львів. – 2014. — С. 74. (Дати проведення: 22-24 червня 2014 р., форма участі – заочна участь)

15. Федевич О. Дослідження трафіку комп'ютерних мереж засобами аналізатора мережевих протоколів // Збірник тез доповідей підсекції «Інформаційні управляючі системи і технології» 72-ої науково-технічної студентської конференції. – Львів. – 2014. – С. 142-144. (Дати проведення: 08 жовтня 2014 р., форма участі – очна доповідь)

16. Droniuk I. Construction of Noise-like signals Based on Ateb – Functions / Droniuk I., Fedevych O. // Матеріали XIII Міжнародної науково-технічної конференції «Досвід розробки і застосування САПР в мікроелектроніці» (CADSM 2015). — Львів-Поляна. – 2015. — С. 42 – 44. (Дати проведення: 24 -27 лютого 2015 р., форма участі – співдоповідач)

17. Dronyuk I. Synthesis of noise-like signals based on Ateb-functions / Dronyuk I., Nazarkevych M., Fedevych O. // In Proceedings of The 18-th International Conference on Distributed Computer and Communication Networks: Control, Computation, Communications (DCCN-2015). Moscow: JSC "TECHNOSPHERA". – 2015. – P.223-232. (Дати проведення: 19-22 жовтня 2015 р., форма участі – заочна участь)

18. Кордяк В.І. Аналізатор роботи комп'ютерної мережі на базі QT framework / Кордяк В.І., Федевич О.Ю. // Матеріали п'ятої науково-практичної конференції FOSS Lviv. – 2015. – С.55-56. (Дати проведення: 26 квітня 2015 р., форма участі – співдоповідач)

19. Дронюк І.М. Аналіз трафіку на основі даних програмного забезпечення Wireshark / Дронюк І.М., Федевич О.Ю., Кордяк В.І. // Матеріали міжнародної наукової конференції «Інтелектуальні системи прийняття рішень та проблеми обчислювального інтелекту» (ISDMCI 2015). – Херсон, видавництво ХНТУ, 2015. – С. 56-59. (Дати проведення: 25-28 травня 2015 р., форма участі – заочна участь)

20. Droniuk I. Forecasting of the trend of traffic based on Ateb-functions theory / Droniuk I., Fedevych O. // Proceedings of the 10-th International Scientific and Technical Conference «Computer Science and Information Technologies» (CSIT 2015) Lviv. – 2015. –

P.139 - 141. (Дати проведення: 14-17 вересня 2015 р., форма участі – очна доповідь) (Scopus)

21. Дронюк І.М. Оптимізація роботи комп'ютерних мереж за критерієм ефективного використання вузлового обладнання / Дронюк І.М., Федевич О.Ю., Труняк М.С. // Матеріали VI-ї Всеукраїнської науково-практичної конференції «Сучасні інформаційні технології в економіці, менеджменті та освіті» (СІТЕМ 2015) Львів. — 2015. — С.63 — 66. (Дати проведення: 30 листопада 2015 р., форма участі – співдоповідач)

22. Droniuk I. Computer network protocol analyzer designed for accuracy of traffic trends forecasting / Droniuk I., Fedevych O. // Матеріали XII Міжнародної науково-технічної конференції «Перспективні технології і методи проектування МЕМС» (MEMSTECH 2016) Львів-Поляна. — 2016. — С. 155 – 157. (Дати проведення: 20-24 квітня 2016 р., форма участі – заочна участь)

23. Федевич О.Ю. Програмне забезпечення для аналізу протоколів комп'ютерної мережі для ОС Ubuntu // Матеріали шостої міжнародної конференції FOSS Lviv. – 2016. – С.22-23. (Дати проведення: 19-22 квітня 2016 р., форма участі – заочна участь)

24. Дронюк І.М. Аналізатор трафіку потоку з вбудованим модифікованим алгоритмом маршрутизації / Дронюк І.М., Федевич О.Ю. // Матеріали XII міжнародної наукової конференції «Інтелектуальні системи прийняття рішень та проблеми обчислювального інтелекту» (ISDMCI 2016) Залізний порт. — 2016. — С.61 — 63. (Дати проведення: 24-28 травня 2016 р., форма участі – заочна участь)

25. Droniuk I. Ateb-prediction Simulation of Traffic Using OMNeT++ Modeling Tools / Droniuk I., Fedevych O, Lipinski P. // Proceedings of the 10-th International Scientific and Technical Conference «Computer Science and Information Technologies» (CSIT 2016) Lviv. – 2016. – P.96 - 98. (Дати проведення: 6-10 вересня 2016 р., форма участі – очна доповідь) (Scopus)

26. Droniuk I. The Generalized shift operator and non-harmonic signal analysis / Droniuk I., Fedevych O., Poplavska Z. // Матеріали XIV Міжнародної науково-технічної конференції «Досвід розробки і застосування САПР в мікроелектроніці» (CADSM 2017) Львів-Поляна. — 2017. — С. 89 – 91. (Дати проведення: 21-25 лютого 2017 р., форма участі – заочна участь) (Scopus)

27. Droniuk I. Optimization of the Computer Network work based on Adaptive Management of Node Equipment / Droniuk I. Fedevych O., Maslanych I. // Proceedings of the 11-th International Scientific and Technical Conference «Computer Science and Information Technologies» (CSIT 2017) Lviv. – 2017. – P. 272-275. (Дати проведення: 05-07 вересня 2017 р., форма участі – співдоповідач) (Scopus)

*Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:*

28. Пат. 106989 Україна, МПК:Н04L 12/02, Н03Н 21/00 Пристрій для адаптивного управління трафіком потоку в сегменті комп'ютерної мережі / І.М. Дронюк, О.Ю. Федевич; власник Нац. ун-т «Львів. політехніка». – № 201512669 ; заявл. 21.12.2015; опублік. 10.05.2016, Бюл. № 9. – 2 с.

29. Комп'ютерна програма “Аналізатор мережевих протоколів з прогнозуванням поведінки трафіку потоку”: свід. про реєстр. автор. права на твір № 72331 / Дронюк Іванна Мирославівна, Лізанець Данило Іванович, Федевич Ольга Юріївна; Національний університет «Львівська політехніка». – Зареєстр. в Упр. держ. Реєстрацій Департаменту інтелектуальної власності Мін. Економічного розвитку і торгівлі України заявка 13.03.2017 № 72608; Реєстр. 21.06.2017.

**ДОДАТОК 2**  
**Вибірки трафіку на вузлах кафедри АСУ НУ «ЛП» та Інституту теоретичної та прикладної інформатики Польської Академії Наук**

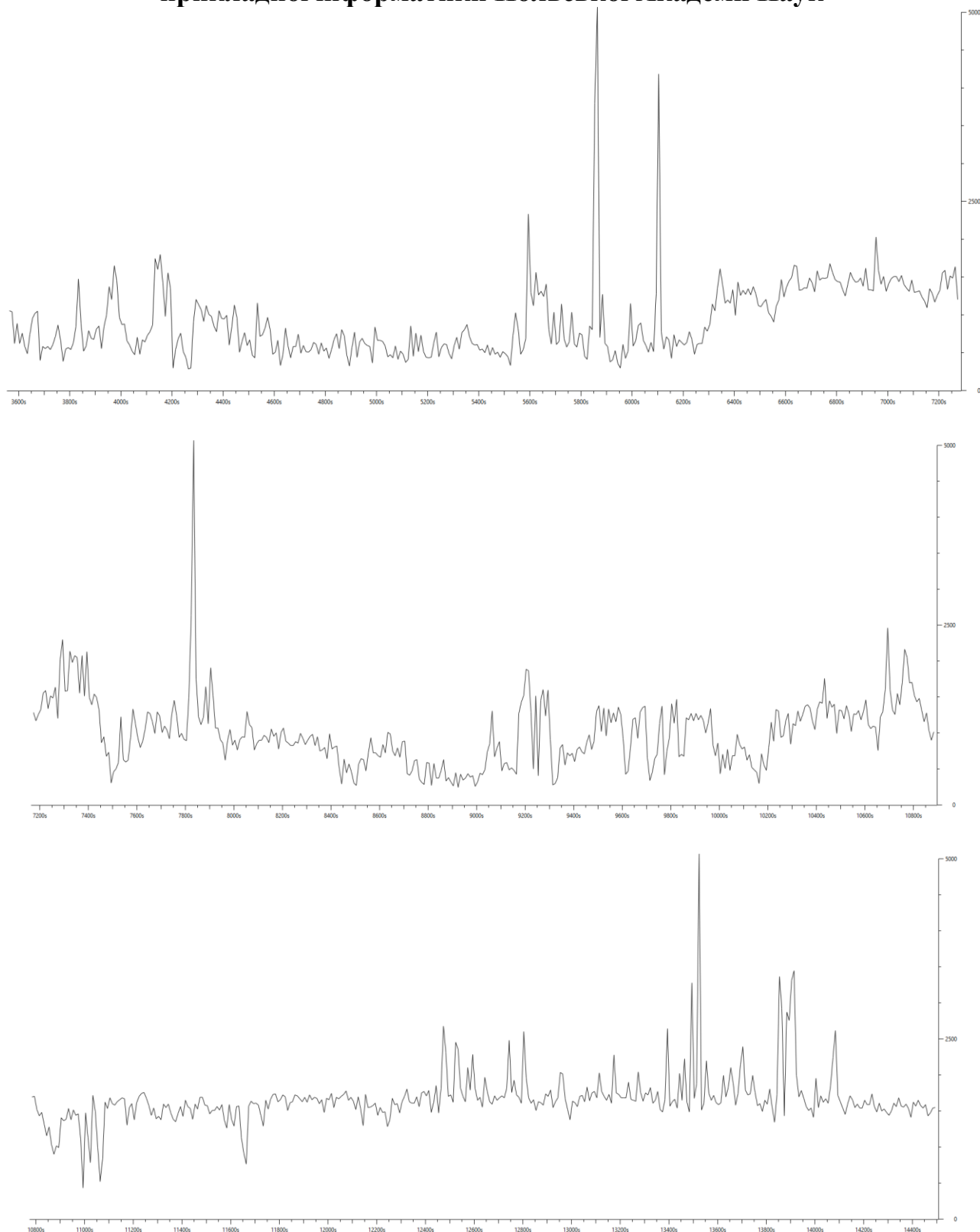


Рис. 1-3 Результати вимірювання трафіку в комп'ютерній мережі кафедри АСУ НУ «ЛП» за 4-6 травня 2015 року

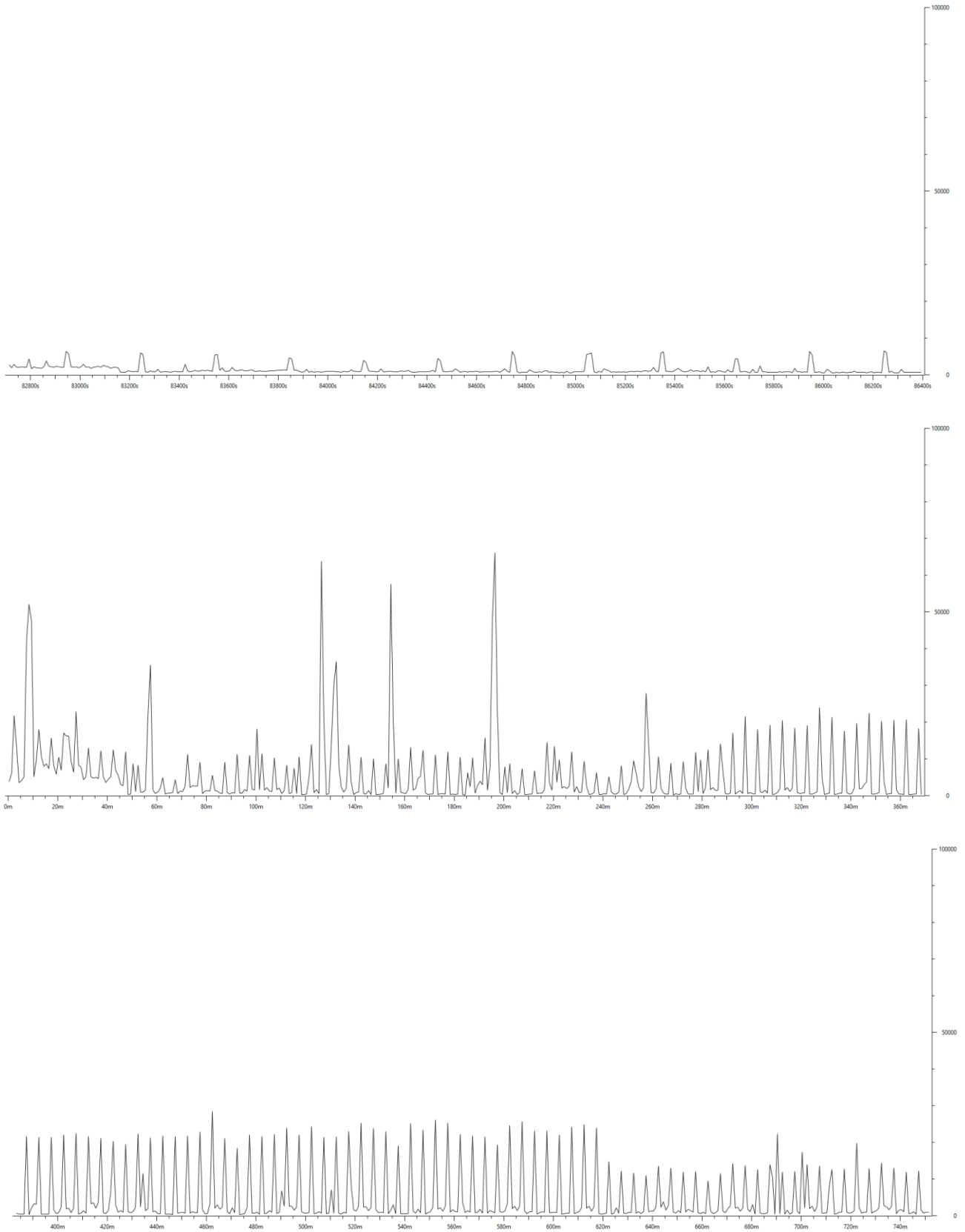


Рис. 4-6 Результати вимірювання трафіку в комп'ютерній мережі ІТАІ PAS за 4-6 травня 2015 року



## ДОДАТОК 3

### Частина програмного коду розробленого ПЗ

```

#include "mainwindow.hpp"
#include "D/graphwindow.hpp"
#include "ui_mainwindow.h"
#include "db.hpp"
#include "connectiondialog.hpp"
#include "dataprocessor.hpp"
#include "QtConcurrent/QtConcurrent"

CaptureWindow * ccw;

void handle(char * msg){
    QString qs(msg);
    ccw->addMsg(qs);
    free(msg);
}

void final(){

    ccw->final();
}

MainWindow::MainWindow(QWidget *parent) :
    QMainWindow(parent),
    ui(new Ui::MainWindow)
{
    core = new Core;
    ui->setupUi(this);
    ui->plot->setInteractions(QCP::iRangeZoom | QCP::iRangeDrag);
    ui->plot->axisRect()->setRangeZoom(Qt::Horizontal);
    ui->plot->axisRect()->setRangeDrag(Qt::Horizontal);

    ui->plot_c->setInteractions(QCP::iRangeZoom | QCP::iRangeDrag);
    ui->plot_c->axisRect()->setRangeZoom(Qt::Horizontal | Qt::Vertical);
    ui->plot_c->axisRect()->setRangeDrag(Qt::Horizontal | Qt::Vertical);
    connect(ui->plot, SIGNAL(mouseRelease(QMouseEvent*)), this,
    SLOT(on_Zoom(QMouseEvent*)));
    timer = new QTimer(this);
    connect(timer, SIGNAL(timeout()), this, SLOT(Update()));
    status = new QLabel(this);
    ui->statusBar->addWidget(status);
    QStringList items;
    items << "sin" << "sa(1/7,3)" << "sa(1/5,1)" << "sa(1/3,1)" << "sa(0.01,0.1)" <<
    "sa(1,7)" << "sa(1,1/3)";
    ui->comboBox->addItem(items);
    ui->sw->hide();
    ui->plot->plotLayout()->insertRow(0);
    ui->plot->plotLayout()->addElement(0, 0, new QCPPlotTitle(ui->plot, "Traffic and
packet number"));

    ui->plot_c->plotLayout()->insertRow(0);
    ui->plot_c->plotLayout()->addElement(0, 0, new QCPPlotTitle(ui->plot_c, "Interval
-> Correlation"));
    qRegisterMetaType<Core::Data>("Core::Data");
    qRegisterMetaType<Core::BestInterval>("Core::BestInterval");
    qRegisterMetaType<Core::CorrData>("Core::CorrData");
    connect(core, SIGNAL(sendData(Core::Data)), this, SLOT(setData(Core::Data)),
    Qt::QueuedConnection);
    connect(core, SIGNAL(sendInterval(Core::BestInterval)), this,
    SLOT(setInterval(Core::BestInterval)), Qt::QueuedConnection);

```

```

    connect(core, SIGNAL(sendCorrelations(Core::CorrData)), this,
    SLOT(plotCorrelations(Core::CorrData)));
}

/*!
 * \brief MainWindow::~MainWindow
 */
MainWindow::~MainWindow()
{
    DB::getInstance().~DB();
    delete ui;
}

void MainWindow::on_showButton_clicked()
{
    ui->plot->clearGraphs();
    ui->plot->clearPlottables();

    auto nums = DB::getInstance().getPacketNumberFromTo(ui->from->dateTime(), ui->to-
>dateTime());

    auto traf = DB::getInstance().getTrafficFromTo(ui->from->dateTime(), ui->to-
>dateTime());

    DataProcessor::normalize(nums, false);
    ui->plot->addGraph(ui->plot->xAxis, ui->plot->yAxis);
    if(ui->actionSimilarity->isChecked()){
        ui->plot->graph(0)->setData(curr_data.first, curr_data.second);
        ui->plot->graph(0)->setName("Difference");
        ui->plot->yAxis->setLabel("Difference");
        ((QCPPlotTitle*)ui->plot->plotLayout()->element(0,0))->setText("Difference ("
+ ui->comboBox->currentText() + ")");
        ui->plot->graph(0)->setBrush(QBrush(QColor(0, 255, 0, 20)));
        ui->plot->graph(0)->setPen(QPen(QColor(0, 255, 0, 255)));
        ui->plot->graph(0)->setScatterStyle(QCPScatterStyle(QCPScatterStyle::ssDisc,
5));
    }else if(ui->actionMatch->isChecked()){
        const auto tt = DataProcessor::toMinutes(traf);
        if (tt.first.isEmpty()) return;
        QVector<double> res = core->generateSequence(tt.second.begin(),
tt.second.end(), best_interval.first);
        res = core->rotate(res, best_interval.second);
        double corr = core->correlation(tt.second, res);
        double k1 = core->k(tt.second)*100;
        double k2 = core->k(res)*100;
        log("Best period: " + QString::number(best_interval.first) + " minutes.");
        log("Function: " + ui->comboBox->currentText() + " " + QString::number(corr)
+ " " + QString::number(k1) + " " + QString::number(k2));
        ui->plot->graph(0)->setData(tt.first, res);
        ui->plot->graph(0)->setName("Match");
        ui->plot->yAxis->setLabel("Match");
        ((QCPPlotTitle*)ui->plot->plotLayout()->element(0,0))->setText("Match (" +
ui->comboBox->currentText() + ")");
        ui->plot->graph(0)->setBrush(QBrush(QColor(0, 0, 0, 20)));
        ui->plot->graph(0)->setPen(QPen(QColor(0, 0, 0, 255)));
    }else if(ui->actionPackets->isChecked()){
        ui->plot->graph(0)->setName("Packet number");
        ui->plot->graph(0)->setData(nums.first, nums.second);
        ui->plot->yAxis->setLabel("Packet number");
        ((QCPPlotTitle*)ui->plot->plotLayout()->element(0,0))->setText("Traffic and
packet number");
        ui->plot->graph(0)->setBrush(QBrush(QColor(0, 0, 255, 20)));
        ui->plot->graph(0)->setPen(QPen(QColor(0, 0, 255, 255)));
    }
}

```

```

    ui->plot->graph(0)->setLineStyle(QCPGraph::lsLine);
}
ui->plot->xAxis->setLabel("Time");

auto sum = DataProcessor::normalize(traf, true);
if(ui->actionMinutes->isChecked()) {
    status->setText("Average traffic: " + QString::number(sum/((ui->to-
>dateTime().toTime_t() - ui->from->dateTime().toTime_t()/60))+" kb/m");
} else if(ui->actionHours->isChecked()) {
    status->setText("Average traffic: " + QString::number(sum/((ui->to-
>dateTime().toTime_t() - ui->from->dateTime().toTime_t()/3600))+" kb/h");
} else if(ui->actionDays->isChecked()) {
    status->setText("Average traffic: " + QString::number(sum/((ui->to-
>dateTime().toTime_t() - ui->from->dateTime().toTime_t()/84600))+" kb/d");
} else {
    status->setText("Average traffic: " + QString::number(sum/((ui->to-
>dateTime().toTime_t() - ui->from->dateTime().toTime_t()))+" kb/s");
}
ui->plot->graph(0)->rescaleAxes();

if(!ui->actionDays->isChecked()) {
    ui->plot->addGraph(ui->plot->xAxis, ui->plot->yAxis2);
    ui->plot->graph(1)->setData(traf.first, traf.second);
    ui->plot->graph(1)->rescaleAxes();
    ui->plot->graph(1)->setBrush(QBrush(QColor(255, 0, 0, 20)));
    ui->plot->graph(1)->setPen(QPen(QColor(255, 0, 0, 255)));
    ui->plot->graph(1)->setName("Traffic");
} else {
    QCPBars *bars1 = new QCPBars(ui->plot->xAxis, ui->plot->yAxis2);
    ui->plot->addPlottable(bars1);
    bars1->setWidth(84600/2);
    bars1->setData(traf.first, traf.second);
    bars1->setPen(QPen(Qt::black));
    bars1->setBrush(QColor(10, 140, 70, 70));
    bars1->rescaleAxes();
}

ui->plot->yAxis2->setLabel("Traffic [kb]");
ui->plot->xAxis->setTickLabelType(QCPAxis::ltDateTime);
ui->plot->yAxis2->setVisible(true);
ui->plot->legend->setVisible(true);
ui->plot->replot();

if(isBatching) {
    save("./" + ui->comboBox->currentText().replace('/', "div") + "_" +
from.toString("hh.mm.ss_dd.MM.yyyy_") + ui->prefix->text() + ".png", true);
}
}

void MainWindow::on_Zoom(QMouseEvent *e)
{
    ui->plot->graph(0)->rescaleValueAxis();
    ui->plot->graph(1)->rescaleValueAxis();
    ui->plot->replot();
    e->accept();
}

void MainWindow::on_actionLog_triggered(bool checked)
{
    if(checked) {
        ui->plot->yAxis->setScaleType(QCPAxis::stLogarithmic);
        ui->plot->yAxis2->setScaleType(QCPAxis::stLogarithmic);
        ui->plot->yAxis->setScaleLogBase(2);
    }
}

```

```

        ui->plot->yAxis2->setScaleLogBase(2);
        ui->plot->replot();
    }else{
        ui->plot->yAxis->setScaleType(QCPAxis::stLinear);
        ui->plot->yAxis2->setScaleType(QCPAxis::stLinear);
        ui->plot->replot();
    }
}

void MainWindow::on_actionAutoupdate_triggered(bool checked)
{
    if(checked){
        auto to = QDateTime::currentDateTime();
        auto from = to.addSecs(-60*10);
        ui->from->setDateTime(from);
        ui->to->setDateTime(to);
        on_showButton_clicked();
        timer->start(1000);
    }else{
        timer->stop();
    }
}

void MainWindow::Update()
{
    on_actionAutoupdate_triggered(true);
}

/*!
 * \brief MainWindow::on_actionMinutes_triggered
 * \param checked
 */
void MainWindow::on_actionMinutes_triggered(bool checked)
{
    DataProcessor::setMinutes(checked);
    ui->actionHours->setChecked(false);
    ui->actionDays->setChecked(false);
    on_showButton_clicked();
}

```

ДОДАТОК 4  
Акти впровадження результатів дисертаційних досліджень



Gliwice, 03.02.2017 r

**Research implementation statement**

The results of the PhD thesis of Ms Olga Fedevych concerning the analysis of traffic flows in computer networks were implemented and used to investigate and interpret the traffic monitored inside our institute computer network. We used it in our computer network analyzer and an analysis of various network traffic flows under different conditions was done. Possibilities for increasing of efficient use of computer networks nodal equipment were considered. The main results of this study were presented at the “23th International Science Conference: Computer Networks – CN2016” and published in “Computer Networks” in series CCIS Vol. 608 (ISSN 1865-0929), Springer – Verlag.

DYREKTOR INSTYTUTU  
  
Prof. dr hab. inż. Tadeusz Czachórski

INSTYTUT INFORMATYKI  
TEORETYCZNEJ I STOSOWANEJ  
POLSKIEJ AKADEMII NAUK  
44-100 GLIWICE, ul. Bałtycka 5  
tel. (32) 231-73-19 fax (32) 231-70-26  
Regon 000564702 NIP 631-011-22-45

Переклад українською з англійської мови

[Логотип]

**ІНСТИТУТ ТЕОРЕТИЧНОЇ ТА ПРИКЛАДНОЇ ІНФОРМАТИКИ  
ПОЛЬСЬКОЇ АКАДЕМІЇ НАУК**

44-100 Глівіце, вул. Балтицка, 5, ПІН 631-011-22-45  
тел.: +48 32 2317319, факс: 2317026, РЕГОН 000564702

Глівіце, 3 лютого 2017 року

**Довідка про впровадження результатів дисертаційної роботи**

Результати кандидатської дисертації Пані Ольги Федевич щодо аналізу потоку трафіку в комп'ютерних мережах були впроваджені та використані з метою дослідження та обробки трафіку, моніторинг якого здійснювався в комп'ютерній мережі нашого інституту. Ми використали їх у нашому аналізаторі комп'ютерної мережі, а також провели аналіз різноманітного потоку трафіку в мережі при різних умовах. Було розглянуто можливості підвищення ефективності використання вузлового обладнання комп'ютерних мереж. Основні результати цього дослідження були представлені на «23 Міжнародній Науковій Конференції: Комп'ютерні Мережі – CN2016» та опубліковані в журналі «Комп'ютерні Мережі», серія CCIS, Номер 608 (ISSN 1865 -0929), Springer – Verlag.

[Штамп:]

Директор Інституту

/Підпис/

Професор, Доктор технічних наук  
Тадеуш Чахорські

ІНСТИТУТ ТЕОРЕТИЧНОЇ ТА  
ПРИКЛАДНОЇ ІНФОРМАТИКИ  
ПОЛЬСЬКОЇ АКАДЕМІЇ НАУК  
44-100 Глівіце, вул. Балтицка, 5,  
тел.: (32) 231-73-19, факс: (32) 231-70-26,  
РЕГОН 000564702, ПІН 631-011-22-45

Переклад вірний та відповідає оригіналу.  
Переклад українською мовою з англійської та польської мов виконано в Бюро  
перекладів «ЕВЕРЕСТ»



Gliwice, 03.02.2017 r

**Research implementation statement**

The results of the PhD thesis of Ms Olga Fedevych concerning the analysis of traffic flows in computer networks were implemented and used to investigate and interpret the traffic monitored inside our institute computer network. We used it in our computer network analyzer and an analysis of various network traffic flows under different conditions was done. Possibilities for increasing of efficient use of computer networks nodal equipment were considered. The main results of this study were presented at the “23th International Science Conference: Computer Networks – CN2016” and published in “Computer Networks” in series CCIS Vol. 608 (ISSN 1865-0929), Springer – Verlag.

DYREKTOR INSTYTUTU

  
Prof. dr hab. inż. Tadeusz CzachórskiINSTYTUT INFORMATYKI  
TEORETYCZNEJ I STOSOWANEJ  
POLSKIEJ AKADEMII NAUK  
44-100 GLIWICE, ul. Bałtycka 5  
tel. (32) 231-73-19 fax (32) 231-70-26  
Regon 000564702 NIP 631-011-22-45





Прошито, пронумеровано  
та скріплено печаткою  
2980 аркуш (4)

Центр іноземних мов  
"EVEREST"

"ЗАТВЕРДЖУЮ"

Директор  
ІПІ «Цифрові технології»

 Танчак З.В.  
«30» грудня 2016 р.  
79014, м. Львів, вул. Б. Котика, б. 5,  
офіс 303

### АКТ

про впровадження результатів дисертаційної роботи на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

**Федевич Ольги Юрївни**

Даний акт складений про те, що в результаті спільних наукових досліджень в галузі інформаційних технологій підприємством був використаний метод прогнозування інтенсивності трафіку потоку, з використанням диференціальних рівнянь коливного руху, що розроблений Федевич О.Ю., при модифікації програмного забезпечення мережевого обладнання комп'ютерної мережі підприємства.

Підприємство підтверджує працездатність розробленого методу для розв'язання задачі прогнозування інтенсивності трафіку за необхідними функціональними параметрами комп'ютерної мережі. Параметри комп'ютерної мережі отримуються у процесі роботи програмного забезпечення. Вхідні дані для роботи модифікованого програмного забезпечення отримуються на основі трафіку комп'ютерної мережі підприємства.

Результатом роботи розробленого програмного забезпечення є підвищення ефективності роботи комп'ютерної мережі підприємства за рахунок зменшення завантаження її мережевого обладнання. Введені модифікації програмного забезпечення дозволяють не тільки регулювати завантаженість комп'ютерної мережі у реальному часі, але і надають можливість аналізувати стан комп'ютерної мережі протягом тривалих періодів часу.

Акт складений для пред'явлення до спеціалізованої вченої ради із захисту дисертацій і не є підставою для фінансових розрахунків.

Головний інженер



Дроф'як А.В.

УКРАЇНА



# СВІДОЦТВО

про реєстрацію авторського права на твір

№ 72331

Комп'ютерна програма "Аналізатор мережевих протоколів з прогнозуванням поведінки трафіку потоку"

(вид, назва твору)

Автор(и) Дронюк Іванна Мирославівна, Лізачець Данило Іванович, Федевич Ольга Юріївна

(повне ім'я, псевдонім (за наявності))

21.06.2017



Державний секретар Міністерства економічного розвитку і торгівлі України **О.Ю.Перевезенцев**

**МІНІСТЕРСТВО ЕКОНОМІЧНОГО РОЗВИТКУ І ТОРГІВЛІ УКРАЇНИ**  
(Мінекономрозвитку України)

Вул. М. Грушевського, 12/2, м. Київ, 01008, тел. 253-93-94, факс 226-31-81  
Web: <http://www.me.gov.ua>, e-mail: [meconomy@me.gov.ua](mailto:meconomy@me.gov.ua), код ЄДРПОУ 37508596

**Р І Ш Е Н Н Я**

**ПРО РЕЄСТРАЦІЮ АВТОРСЬКОГО ПРАВА НА ТВІР**

Міністерство економічного розвитку і торгівлі України розглянула заяву

**Дронюк Іванна Мирославівна, вул. Героїв УПА, буд. 76, кв. 8, м. Львів, Івано-Франківський район, 79015**

(повне ім'я автора, адреса)

заявка від 13.03.2017 № 72608

про реєстрацію авторського права на твір і прийняла рішення зареєструвати авторське право на твір **Комп'ютерна програма "Аналізатор мережевих протоколів з прогнозуванням поведінки трафіку потоку"**; **Дронюк Іванна Мирославівна, Лізанець Данило Іванович, Федевич Ольга Юрївна**

(вид, повна, скорочена (за наявності) назва твору, повне ім'я, псевдонім (за наявності) автора (ів))

Внесення відомостей до Державного реєстру свідоцтв про реєстрацію авторського права на твір та видача свідоцтва будуть здійснені за умови сплати збору за оформлення і видачу свідоцтва про реєстрацію авторського права на твір відповідно до п.3 постанови Кабінету Міністрів України від 27 грудня 2001 року № 1756 "Про державну реєстрацію авторського права і договорів, які стосуються права автора на твір".

Якщо протягом трьох місяців від дати одержання заявником рішення про реєстрацію авторського права на твір Управління державних реєстрацій Департаменту інтелектуальної власності Міністерства економічного розвитку і торгівлі України не одержала документ про сплату збору за оформлення і видачу свідоцтва у розмірі та порядку, визначених законодавством, або копію документа, що підтверджує право на звільнення від сплати зазначеного збору, заявка вважається відхиленою і реєстрація авторського права та публікація відомостей про реєстрацію Управлінням державних реєстрацій Департаменту інтелектуальної власності Міністерства економічного розвитку і торгівлі України не проводиться.

**Державний секретар Міністерства економічного розвитку і торгівлі України**

**О.Ю.Перевезенцев**





**«ЗАТВЕРДЖУЮ»**

проректор з наукової роботи  
Національного університету

«Львівська політехніка»

професор Чухрай Н.І.

«*во*» *н* 2017 р.

**АКТ**

про використання наукових результатів дисертаційної роботи

**Федевич Ольги Юріївни**

**«Інформаційна технологія аналізу та прогнозування трафіку в комп'ютерних мережах»**

представленої на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук  
за спеціальністю 05.13.06 – Інформаційні технології

Комісія в складі: начальника науково-дослідної частини, к.т.н., доцента Жук Л.В., та членів комісії – завідувача кафедри автоматизованих систем управління д.т.н., професора Цмоця І.Г., завідувача відділу науково-організаційного супроводу наукових досліджень, к.т.н. Лазько Г.В. та заступника начальника планово-фінансового відділу Чулой Т.М. цим актом підтверджує, що результати дисертаційної роботи Федевич О.Ю. використовувалися при виконанні спільного україно-австрійського науково-дослідного проекту «Моделювання трафіку та телекомунікаційних мереж» (№ держреєстрації 0117U001612).

Федевич О.Ю. розробила метод короткострокового прогнозування інтенсивності трафіку та на цій основі розробила інформаційну технологію прогнозування трафіку в комп'ютерних мережах, що забезпечила зменшення затримок передавання пакетів з даними у комп'ютерних мережах та удосконалила процес обслуговування самоподібного мережного трафіку даних.


Голова комісії:

начальник науково-дослідної частини,  
к.т.н., доц.

 Л.В. Жук

Члени комісії:


зав. відділу науково-організаційного  
супроводу наукових досліджень, к.т.н.

 Г.В. Лазько

заст.нач.планово-фінансового відділу

 Т.М. Чулой

зав. каф. автоматизованих систем управління,  
д.т.н., проф.

 І.Г. Цмоць



«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Проректор з науково-педагогічної роботи  
 Національного університету  
 «Львівська політехніка»

О.Р. Давидчак

" 11 " 2017 р.

**А К Т**

про впровадження в навчальний процес результатів  
 кандидатської дисертаційної роботи  
**Федевич Ольги Юріївни**

Цей акт складено про те, що результати кандидатської дисертаційної роботи Федевич Ольги Юріївни на тему «Інформаційна технологія аналізу та прогнозування трафіку в комп'ютерних мережах», представленої на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук, використовуються у навчальному процесі кафедри «Автоматизовані системи управління» Національного університету «Львівська політехніка». Матеріали дисертаційного дослідження використовуються під час написання студентами курсових робіт, кваліфікаційних бакалаврських та магістерських робіт, а також під час викладання дисципліни «Математичні методи дослідження операцій».

Зокрема, у навчальному процесі використовуються запропоновані О.Ю. Федевич:

- удосконалений метод маршрутизації трафіку в трактах обміну даними, що забезпечує покращення процесу обслуговування самоподібного (з високим коефіцієнтом Херста) мережного трафіку даних в режимі реального часу (дисципліна «Математичні методи дослідження операцій», тема 3 «Транспортні задачі» для студентів освітньо-кваліфікаційного рівня «бакалавр», що навчаються за спеціальністю 122 «Комп'ютерні науки»).

Ефект від використання результатів кандидатської дисертаційної роботи Федевич О.Ю. полягає у вивченні майбутніми фахівцями сучасних методів та інформаційних технологій для аналізу трафіку даних у комп'ютерних мережах.

Директор ІКНІ,  
 д.т.н., професор

М.О. Медиковський

Завідувач кафедри АСУ,  
 д.т.н., професор

І.Г. Цмоць

Професор кафедри АСУ, д.т.н.

В.В. Грицик