

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

ТРЕНЬОВА КАТЕРИНА ОЛЕКСАНДРІВНА

УДК:004.04:621.391.83

ДИСЕРТАЦІЯ

**МЕТОДИКА ОПЕРАТИВНОГО АНАЛІЗУ ХАРАКТЕРИСТИК ТРАФІКУ
ДЛЯ АВТОМАТИЗОВАНОГО УПРАВЛІННЯ ЯКІСТЮ ПОСЛУГ У
МУЛЬТИСЕРВІСНИХ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМАХ**

Спеціальність 172 «Телекомунікації та радіотехніка»

Галузь знань 17 «Електроніка та телекомунікації»

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

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

_____ К.О. Треньова

Науковий керівник: Домрачева Катерина Олексіївна, кандидат технічних наук,
доцент

Київ - 2024

АНОТАЦІЯ

Тренцова К.О. Методика оперативного аналізу характеристик трафіку для автоматизованого управління якістю послуг у мультисервісних інформаційних системах. - Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 172 «Телекомунікації та радіотехніка» — Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій Міністерства освіти і науки України, Київ, 2024.

У дисертаційній роботі вирішується актуальне науково-технічне завдання щодо вдосконалення методики оперативного оцінювання параметрів трафіку в мультисервісних інформаційних системах, які працюють у режимі реального часу.

У контексті сучасного розвитку інформаційних технологій та широкого впровадження цифрових комунікацій, питання ефективного управління трафіком в мультисервісних інформаційних системах набуває особливої актуальності. Інформаційні системи, які об'єднують численні різноманітні сервіси та платформи, стають ключовими елементами в структурі будь-якого сучасного підприємства, забезпечуючи не тільки внутрішнє та зовнішнє комунікаційне покриття, але й гарантуючи оперативність обробки даних і високу якість обслуговування користувачів.

Забезпечення стабільності та ефективності в роботі таких систем є складним завданням, оскільки потребує розробки методів оцінювання та аналізу трафіку, що можуть ефективно реагувати на динамічні зміни в параметрах мережевої активності. Наукова значимість цієї проблеми полягає в постійному зростанні обсягів даних та збільшенні кількості мережевих взаємодій, що ускладнює процеси управління та оптимізації мережевих ресурсів.

Дисертаційна робота має на меті розробку новітніх методів оперативного аналізу та оцінювання характеристик трафіку, які дозволять

підвищити точність управлінських рішень, пов'язаних з якістю послуг у високошвидкісних мультисервісних інформаційних системах. Основою дослідження є передові наукові підходи та технічні інновації, зокрема, умовна нелінійна Парето-оптимальна фільтрація, яка дозволяє враховувати багатокритеріальність та непередбачуваність мережевих процесів.

Дослідження, проведене в рамках цієї дисертаційної роботи, дозволило розробити та впровадити комплекс адаптивних алгоритмів для оперативного оцінювання характеристик трафіку в мультисервісних інформаційних системах. Ці алгоритми забезпечують значно вищу точність оцінок, порівняно з іншими подібними методами, завдяки інноваційному підходу до аналізу мережевих даних, який включає умовну нелінійну Парето-оптимальну фільтрацію. Такий підхід дозволяє враховувати множинність критеріїв при оцінці якості мережевих послуг і адаптуватися до змінних умов мережі в режимі реального часу.

Удосконалено модель процесу оперативної оцінки характеристик трафіку, що інтегрує алгоритми швидкого реагування на зміни в мережевому навантаженні. Ця модель використовує комплекс математичних методів для аналізу великих обсягів даних, що дозволяє забезпечити більш високий рівень точності у прогнозуванні потенційних проблем у мережі та ефективності управління якістю зв'язку.

Науковий внесок також полягає в розробці та апробації комплексу технічних заходів для реалізації розроблених алгоритмів на сучасних апаратно-програмних платформах. Це включає використання інтелектуальних агентів на базі високопродуктивних мікропроцесорних модулів, які оптимізують використання обчислювальних та мережевих ресурсів, забезпечуючи максимальну швидкість обробки даних і мінімізацію затримок у передачі інформації.

Результати дослідження демонструють більшу ефективність у вирішенні задач моніторингу втрат мережевих пакетів, оцінки міжкінцевих затримок, що є критичними для забезпечення високої якості послуг зв'язку.

Мета дисертації: полягає у підвищенні швидкості та точності оцінювання параметрів трафіку для об'єктивного прийняття рішень щодо управління якістю послуг у високошвидкісних мультисервісних інформаційних системах.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі задачі:

1. Проаналізувати та дослідити мультисервісну інформаційну систему, як систему управління.
2. Дослідити моделі процесу оперативної оцінки характеристик трафіку в високошвидкісних мережах зв'язку.
3. Розробити алгоритми для оперативного оцінювання характеристик трафіку, які забезпечують точність, достатньою для прийняття об'єктивних рішень з управління якістю послуг зв'язку.
4. Дослідити методи реалізації науково-технічних алгоритмів оперативного оцінювання характеристик трафіку на існуючих апаратно-програмних засобах.
5. Розробити метод реалізації алгоритмів оперативного оцінювання характеристик трафіку на існуючих і перспективних апаратно - програмних засобах.

Наукова новизна дисертації:

1. Удосконалено модель процесу оперативної оцінки характеристик трафіку в високошвидкісних інформаційних системах, яка на відміну від відомих ґрунтується на методах нечіткого математичного програмування та дозволяє оперативно отримувати Парето - раціональні управлінські рішення.
2. Розроблено методіку для оперативного оцінювання характеристик трафіку, наукова новизна якої полягає у тому що вона ґрунтується на використанні умовної нелінійної Парето-оптимальної фільтрації, та дозволяє підвищити точність оцінок та мінімізувати помилки при втратах пакетів даних.
3. Вдосконалено метод мережевого управління у мультисервісних інформаційних системах, який на відмінну від існуючих ґрунтується на теорії ієрархічного управління та забезпечує вищу стійкість та надійність мережевих

з'єднань, а також підвищує ефективність управління мережею в умовах різких змін мережевих параметрів.

4. Розроблено методику регулювання параметрів оцінки характеристик трафіку, наукова новизна якої полягає у тому, що вона ґрунтується на методах нечіткого логічного висновку Такагі-Сугено та підвищує точність та адаптивність системи управління.

Практичне значення отриманих результатів полягає в розробці алгоритмів для оперативної оцінки характеристик трафіку у високошвидкісних мультисервісних інформаційних системах, що забезпечує підвищення якості послуг зв'язку. Результати дослідження мають потенціал для технічної реалізації і можуть бути використані при проектуванні та модернізації таких систем, що значно покращує ефективність управління мережевими ресурсами.

Ключові слова : мережа, мультисервісна інформаційна система, Парето-оптимальна фільтрація, методи аналізу трафіку, передача даних, якість обслуговування (QoS), мережевий моніторинг, оперативна оцінка характеристик трафіку, методика, інтелектуальний агент.

ABSTRACT

Trenova K.O. Methods of operational analysis of traffic characteristics for automated management of service quality in corporate multiservice communication networks. - Qualification scientific work on the rights of a manuscript.

D. thesis for the degree of Doctor of Philosophy in the speciality 172 'Telecommunications and Radio Engineering' -- State University of Information and Communication Technologies of the Ministry of Education and Science of Ukraine, Kyiv, 2024.

The dissertation solves an urgent scientific and technical problem of improving the methodology for operational estimation of traffic parameters in corporate multiservice communication networks operating in real time.

In the context of the modern development of information technology and the widespread introduction of digital communications, the issue of efficient traffic management in corporate multiservice communication networks is becoming particularly relevant. Corporate networks that integrate numerous different services and platforms are becoming key elements in the structure of any modern enterprise, providing not only internal and external communication coverage, but also guaranteeing prompt data processing and high quality of user service.

Ensuring stability and efficiency in the operation of such networks is a challenging task, as it requires the development of traffic evaluation and analysis methods that can effectively respond to dynamic changes in network activity parameters. The scientific significance of this problem lies in the constant growth of data volumes and the increasing number of network interactions, which complicates the processes of managing and optimising network resources.

The dissertation aims to develop the latest methods for operational analysis and evaluation of traffic characteristics that will improve the accuracy of management decisions related to the quality of services in high-speed corporate multiservice communication networks. The research is based on advanced scientific approaches and technical innovations, in particular, conditional nonlinear Pareto-

optimal filtering, which allows taking into account the multi-criteria and unpredictability of network processes.

The research carried out in this thesis allowed the development and implementation of a set of adaptive algorithms for the rapid assessment of traffic characteristics in corporate multiservice communication networks. These algorithms provide significantly higher estimation accuracy compared to other similar methods due to an innovative approach to network data analysis that includes conditional nonlinear Pareto-optimal filtering. This approach allows for multiple criteria to be taken into account when assessing the quality of network services and adapting to changing network conditions in real time.

In particular, a new model of the process of rapid assessment of traffic characteristics was developed, which integrates algorithms for rapid response to changes in network load. This model uses a set of mathematical methods to analyse large amounts of data, which allows for a higher level of accuracy in predicting potential network problems and improving the efficiency of communication quality management.

The scientific contribution also consists in the development and testing of a set of technical measures to implement the developed algorithms on modern hardware and software platforms. This includes the use of intelligent agents based on high-performance microprocessor modules that optimise the use of computing and network resources, ensuring maximum data processing speed and minimising delays in information transmission.

The results of the study demonstrate greater efficiency in solving the tasks of monitoring network packet losses and estimating end-to-end delays, which are critical for ensuring high quality communication services.

The aim of the dissertation is to increase the speed and accuracy of traffic parameters estimation for objective decision-making on service quality management in high-speed corporate multiservice communication networks.

In order to achieve this goal, the following tasks need to be solved:

1. To analyse and study the corporate multiservice communication network as a management system.
2. To study models of the process of operational assessment of traffic characteristics in high-speed communication networks.
3. To develop algorithms for the operational assessment of traffic characteristics that provide accuracy sufficient to make objective decisions on the quality management of communication services
4. Investigate methods for implementing scientific and technical algorithms for operational assessment of traffic characteristics on existing hardware and software.
5. To develop a method for implementing algorithms for operational assessment of traffic characteristics on existing and future hardware and software.

Scientific novelty of the dissertation:

1. A model of the process of operational assessment of traffic characteristics in high-speed information systems has been improved, which, unlike the known ones, is based on fuzzy mathematical programming methods and allows to quickly obtain Pareto-rational management decisions.
2. A methodology for rapid assessment of traffic characteristics has been developed, the scientific novelty of which is that it is based on the use of conditional nonlinear Pareto-optimal filtering, and allows to increase the accuracy of estimates and minimise errors in data packet loss.
3. The method of network management in multiservice information systems is improved, which, unlike the existing ones, is based on the theory of hierarchical management and provides higher stability and reliability of network connections, as well as increases the efficiency of network management in the face of sudden changes in network parameters.
4. A methodology for adjusting the parameters for assessing traffic characteristics has been developed, the scientific novelty of which is that it is based on Takagi-Sugeno fuzzy inference methods and increases the accuracy and adaptability of the control system.

The practical significance of the obtained results lies in the development of algorithms for the rapid assessment of traffic characteristics in high-speed corporate multiservice communication networks, which ensures the improvement of the quality of communication services. The results of the study have the potential for technical implementation and can be used in the design and modernisation of such networks, which significantly improves the efficiency of network resource management.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Треньова К.О., Власенко О.В., Методика розрахунку часу затримки в системі керування інфокомунікаційними мережами на базі теорії масового обслуговування, *Науковий журнал “Зв’язок”*, №6(166), с. 3-7, 2023

2. Треньова К.О., Адаптивний метод і алгоритм оперативного оцінювання параметрів трафіку у високошвидкісних мережах зв’язку, *Науковий журнал «Наукові записки Державного університету телекомунікацій»* №2(4), с. 107-115 2023

3. Треньова К.О., Оптимізація методів прийому сигналів для підвищення завадостійкості широкосмугових систем зв’язку, *Науковий журнал «Телекомунікаційні та інформаційні технології»*, №1(82), с. 79-87, 2024

4. Треньова К.О., Ветлицька О.С. Виявлення атак у мережах інтернету речей методами машинного навчання, *Сучасний захист інформації*, №1(57), с. 39-49, 2024

5. Треньова К.О., Марчук О.М., Миронюк М.Ю., Високопродуктивна архітектура VLSI для вдосконалених моделей QPSK, *Науковий журнал “Зв’язок”*, №4(158), с. 54-57, 2022

6. Треньова К.О., Дробик О.В., Метод оперативного оцінювання стану мережевих елементів для забезпечення якості послуг у корпоративних високошвидкісних мультисервісних мережах зв'язку, *Науковий журнал “Зв’язок”*, №2(168), с. 30-38, 2024

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

1. Треньова К.О., Ветлицька О.С. «Проблеми кіберстійкості ІКТ-систем в умовах цифрової трансформації» на *IV Всеукраїнській науково-практичній конференції «Стратегії кіберстійкості: управління ризиками та безперервність бізнесу»* - ДУІКТ, 28 лютого 2024 року, с. 71-73.

2. Треньова К.О., Ветлицька О.С. «Методика виявлення вразливостей, пов'язаних з параметрами нейронної мережі, в алгоритмах на основі машинного навчання» на *III Всеукраїнській науково-практичній конференції «Сучасні інтелектуальні інформаційні технології в науці та освіті»* - ДУТ, 16 травня 2023 року, с. 45-46.

Зміст

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ	13
ВСТУП	14
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ЗАДАЧІ ОПЕРАТИВНОГО ОЦІНЮВАННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ТРАФІКУ ДЛЯ АВТОМАТИЗОВАНОГО УПРАВЛІННЯ ЯКІСТЮ ПОСЛУГ У МУЛЬТИСЕРВІСНИХ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМАХ	20
1.1 Основні концепції проектування мультисервісної інформаційної системи 20	20
1.1.1 Основні функції мультисервісної інформаційної системи	20
1.1.2 Мультисервісна інформаційна система, як об'єкт управління	21
1.1.3 Аналіз вимог до управління мультисервісною інформаційною системою	29
1.1.4 Основні підходи та інноваційні технології управління інформаційними системами.....	33
1.2 Аналіз методів та технологій, які забезпечують якість послуг зв'язку в мультисервісних інформаційних мережах	39
1.3 Аналіз взаємодії між оцінюванням трафіку та іншими управлінськими задачами в мережах зв'язку	44
1.4 Постановка завдання дослідження.....	46
1.5 Висновки до першого розділу.....	48
2 КОНЦЕПТУАЛЬНА МОДЕЛЬ ПРОЦЕСУ ОПЕРАТИВНОГО ОЦІНЮВАННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ТРАФІКУ ДЛЯ АВТОМАТИЗОВАНОГО УПРАВЛІННЯ ЯКОСТЮ ПОСЛУГ У КОРПОРАТИВНИХ МУЛЬТИСЕРВІСНИХ МЕРЕЖАХ.....	50
2.1 Постановка задачі розробки концептуальної моделі оперативної оцінки характеристик трафіку у мультисервісних інформаційних системах	50
2.2 Аналіз невизначності керуючої інформації у мультисервісних інформаційних системах і методів її вирішення.....	53
2.3 Вивчення показників якості послуг зв'язку у мультисервісних інформаційних системах	55
2.4 Розробка компонентів системної архітектури для оцінювання параметрів трафіку в мультисервісних інформаційних системах	58
2.5 Аналіз ефективності концептуальної моделі оперативного оцінювання параметрів трафіку для управління якістю послуг в мультисервісних інформаційних системах	70
2.6 Висновки до другого розділу	77

3	МЕТОДИКА ОЦІНЮВАННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ТРАФІКУ В МУЛЬТИСЕРВІСНИХ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМАХ	79
3.1	Постановка завдання адаптивної оцінки параметрів трафіку в МІС	79
3.2	Аналіз основних методів та алгоритмів оцінювання параметрів трафіку в мультисервісних інформаційних системах	82
3.3	Розробка алгоритмів оцінки параметрів трафіка у мультисервісних інформаційних системах	89
3.4	Оцінка результатів за допомогою математичного моделювання	96
3.5	Використання алгоритмів оцінювання параметрів трафіку в МІС.....	115
3.6	Висновки до третього розділу.....	119
4.	НАУКОВО-ТЕХНІЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ ДЛЯ АПАРАТНО-ПРОГРАМНОЇ РЕАЛІЗАЦІЇ АЛГОРИТМІВ ОПЕРАТИВНОЇ ОЦІНКИ ПАРАМЕТРІВ ТРАФІКУ В МІС	121
4.1	Оцінка необхідних обчислювальних ресурсів для технічної реалізації алгоритмів оперативної оцінки параметрів трафіку у МІС	121
4.2	Вибір апаратно-програмних комплексів для створення інтелектуальних систем моніторингу трафіку	124
4.3.	Науково-технічні пропозиції програмного забезпечення для реалізації алгоритмів оперативної оцінки параметрів трафіку в МІС	129
4.4	Результати створення макету інтелектуального агента для оцінювання параметрів трафіку в МІС	134
4.5	Висновки до четвертого розділу.....	136
	ВИСНОВКИ.....	138
	СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	142

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

Мультисервісна інформаційна система	МІС
Автоматизована система управління зв'язку	АСУЗ
Середньовкадратичне відхилення	СКВ
Рівні управління елементами	РУЕ
Інтелектуальний агент	ІА
Випадкова послідовність	ВП
Системи масового обслуговування	СМО
Підсистеми оперативної підтримки рішень	ПОПР
Деструктивні фактори	ДФ
Ієрархічні нечіткі ситуаційні мережі	ІНСМ
Псевдоградієнтний алгоритм	ПГА
Якість обслуговування (Quality of Service)	QoS
Програмована логічна інтегральна схема	ПЛІС

ВСТУП

Актуальність проблеми. У контексті сучасного розвитку інформаційних технологій та широкого впровадження цифрових комунікацій, для досягнення високої ефективності управління промислові підприємства, а також масштабні логістичні та транспортні компанії, активно впроваджують автоматизовані системи управління. Основу цих систем складають інфокомунікаційні технології, які відіграють вирішальну роль у забезпеченні оперативного доступу до інформації. Завдяки інфокомунікаційним системам, користувачі можуть отримувати необхідні дані з високою точністю та в повному обсязі, що значно підвищує швидкість прийняття управлінських рішень.

Ці системи забезпечують не тільки швидкий доступ до актуальної інформації, але й високий рівень її безпеки та конфіденційності. Захист даних є критично важливим, особливо у контексті сучасних вимог до приватності та безпеки інформації. Інфокомунікаційні системи дозволяють регулювати доступ до інформації, обмежувати її розповсюдження серед неавторизованих осіб та запобігати можливим витокам.

Автоматизовані інфокомунікаційні системи управління стають невід'ємною частиною стратегічного планування та управління великими компаніями, дозволяючи їм зберігати лідируючі позиції на ринку, реагувати на зміни в операційному середовищі та ефективно управляти ресурсами.

Основою для сучасних інфокомунікаційних систем на багатьох великих підприємствах є мультисервісні інформаційні системи, які інтегрують різні комунікаційні послуги в єдину платформу. Це дозволяє ефективно управляти великими обсягами інформації, сприяючи підвищенню продуктивності і оптимізації внутрішніх процесів компанії.

Мультисервісні інформаційні системи є ключовою частиною критичної інфраструктури, адже їх надійна робота вирішально важлива для забезпечення абонентів якісною інформацією. Ці системи повинні стабільно функціонувати

навіть за умов різних деструктивних впливів, таких як техногенні аварії, кіберзагрози, технічні відмови та інші подібні ситуації. Їх стійкість до зовнішніх впливів та здатність оперативно відновлюватись після порушень є критично важливими для безперебійної роботи компаній.

На сьогодні, незважаючи на значний прогрес у розвитку мережевих технологій, все ще існують нерозв'язані проблеми, пов'язані з оперативним оцінюванням характеристик і параметрів трафіку для автоматизованого управління якістю послуг у мультисервісних інформаційних системах. Це створює певні виклики для забезпечення надійності та ефективності мереж, оскільки точна діагностика і адаптація до змін у трафіку є ключовими для підтримки високих стандартів обслуговування.

Існуючі моделі для оперативного управління якістю послуг та сервісів зв'язку часто не враховують у повній мірі нелінійний та нестаціонарний характер поведінки трафіку в мережі. Це може призводити до недостатньої адаптації до швидких і непередбачуваних змін у трафіку, що ускладнює забезпечення високої якості і надійності комунікаційних послуг.

Однією з ключових особливостей оперативного-технічного та технологічного управління в корпоративній мультисервісній мережі зв'язку є необхідність виконання багатьох управлінських процедур у режимі, який максимально наближений до реального часу. Одночасний контроль за всіма вузлами мережі, що охоплює значну територію, може бути складним завданням оскільки інформація, що отримується в ході мережевого моніторингу і використовується для прийняття управлінських рішень, може бути невизначеною, неточною, неповною та нечіткою. Ці характеристики даних створюють значні виклики для ефективного управління якістю послуг та сервісів зв'язку, що підкреслює актуальність дослідження в даній області.

Враховуючи вказані особливості, автоматизована система управління мережею повинна бути здатна адаптуватися до складнощів, що виникають в результаті різноманітності і змінності трафіку, а також враховувати необхідність швидкого реагування на потенційні проблеми. Це ставить

завдання розробки удосконалених методів і технологій для точної оцінки параметрів мережевого трафіку і ефективного управління якістю сервісів.

Наукове завдання полягає у вдосконаленні методики оперативного оцінювання параметрів трафіку в мультисервісних інформаційних системах, які працюють у режимі реального часу.

Мета та задачі дослідження

Мета дисертації: полягає у підвищенні швидкості та точності оцінювання параметрів трафіку для об'єктивного прийняття рішень щодо управління якістю послуг у високошвидкісних мультисервісних інформаційних системах.

Для досягнення цієї мети необхідно вирішити такі задачі:

1. Проаналізувати та дослідити корпоративну мультисервісну мережу зв'язку, як систему управління.

2. Дослідити моделі процесу оперативної оцінки характеристик трафіку в високошвидкісних мережах зв'язку.

3. Розробити алгоритми для оперативного оцінювання характеристик трафіку, які забезпечують точність, достатньою для прийняття об'єктивних рішень з управління якістю послуг зв'язку

4. Дослідити методи реалізації науково-технічних алгоритмів оперативного оцінювання характеристик трафіку на існуючих апаратно-програмних засобах.

5. Розробити метод реалізації алгоритмів оперативного оцінювання характеристик трафіку на існуючих і перспективних апаратно - програмних засобах.

Об'єктом дослідження є завдання оперативної оцінки характеристик мережевого трафіку для управління якістю послуг зв'язку .

Предметом дослідження є моделі та алгоритми оперативної оцінки характеристик мережевого трафіку для забезпечення якості послуг та сервісів зв'язку.

Методи дослідження Як теоретичну та методологічну основу дисертаційного дослідження використано методи математичної статистики й теорії ймовірностей, методи нечіткого логічного виведення і теорії нечітких множин, методи теорії випадкових процесів, а також методи математичного та чисельного моделювання.

Наукова новизна одержаних результатів полягає у наступному:

1. Удосконалено модель процесу оперативної оцінки характеристик трафіку в високошвидкісних інформаційних системах, яка на відміну від відомих ґрунтується на методах нечіткого математичного програмування та дозволяє оперативно отримувати Парето - раціональні управлінські рішення.

2. Розроблено методику для оперативного оцінювання характеристик трафіку, наукова новизна якої полягає у тому що вона ґрунтується на використанні умовної нелінійної Парето-оптимальної фільтрації, та дозволяє підвищити точність оцінок та мінімізувати помили при втратах пакетів даних.

3. Вдосконалено метод мережевого управління у мультисервісних інформаційних системах, який на відмінну від існуючих ґрунтується на теорії ієрархічного управління та забезпечує вищу стійкість та надійність мережевих з'єднань, а також підвищує ефективність управління мережею в умовах різких змін мережевих параметрів.

4. Розроблено методику регулювання параметрів оцінки характеристик трафіку, наукова новизна якої полягає у тому, що вона ґрунтується на методах нечіткого логічного висновку Такагі-Сугено та підвищує точність та адаптивність системи управління.

Практичне значення отриманих результатів полягає в розробці у розробці алгоритмів для оперативної оцінки характеристик трафіку у високошвидкісних мультисервісних інформаційних системах, що забезпечує підвищення якості послуг зв'язку. Результати дослідження мають потенціал для технічної реалізації і можуть бути використані при проектуванні та модернізації таких мереж, що значно покращує ефективність управління мережевими ресурсами.

Особистий внесок здобувача

Наукові положення та результати дисертації отримані автором самостійно.

В [1] розглянуто методи для розрахунку часу затримки в системах обслуговування, що є критичним параметром для оцінки якості зв'язку та ефективності мережевої інфраструктури. Особлива увага була приділена аналізу систем управління послугами зв'язку, які відіграють важливу роль у забезпеченні надійності та доступності комунікаційних послуг. Проаналізовано, як різні методики розрахунку часу затримки можуть бути застосовані для покращення управління трафіком та оптимізації мережевих процесів, зокрема через впровадження адаптивних алгоритмів, що реагують на коливання у навантаженні та зміни в поведінці трафіку. В [2] розглянуті процеси передачі та управління трафіком, а також зміни його інтенсивності у мультисервісних інформаційних системах. Запропоновано адаптивний алгоритм для оперативного оцінювання характеристик і параметрів трафіку, який працює в режимі реального часу. Цей метод базується на концепції умовної нелінійної Парето-оптимальної фільтрації, що дозволяє адаптуватися до змін у трафіку та забезпечувати ефективне управління мережевими ресурсами. У рамках дослідження [3] було проаналізовано вплив адаптивних завад і порівняно різні методики прийому сигналу. Особлива увага була зосереджена на математичних алгоритмах, що використовуються для визначення показників завадостійкості. В [4] проведений аналіз алгоритму виявлення атак у мережах зв'язку. В [5] проведено аналіз та розроблено критерії та рекомендації стосовно вибору апаратно-програмних засобів для створення програми для керування та аналізу даних, призначеного для оперативної оцінки параметрів мережевого трафіку. В [6] запропоновано інтелектуальні методи та алгоритми для оперативної оцінки стану мережних елементів, що сприяють підтримці показників якості послуг зв'язку у корпоративних мультисервісних мережах, які працюють у режимі, наближеному до реального часу.

Апробація результатів дисертації

Основні положення і результати дисертації, практичні висновки і рекомендації також апробовано на міжкафедральному семінарі Навчально-наукового інституту телекомунікацій Державного університету інформаційно-комунікаційних технологій.

Результати дисертаційної роботи впроваджено в навчальний процес Державного університету інформаційно-комунікаційних технологій при підготовці кваліфікаційних дипломних та курсових робіт та при викладанні навчальних дисциплін.

Публікації

Основні наукові положення та результати дисертаційного дослідження опубліковано в 6 наукових працях. В 6 наукових статтях у періодичних виданнях України включених до “Переліку наукових фахових видань України”.

Структура та обсяг дисертаційної роботи.

Дисертаційна робота складається з анотації, вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел. Загальний обсяг роботи складає 149 сторінок, у тому числі 129 сторінок основного тексту, 56 рисунків та 15 таблиць, списку використаних джерел із 115 найменувань на 8 сторінках.

РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ЗАДАЧІ ОПЕРАТИВНОГО ОЦІНЮВАННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ТРАФІКУ ДЛЯ АВТОМАТИЗОВАНОГО УПРАВЛІННЯ ЯКІСТЮ ПОСЛУГ У МУЛЬТИСЕРВІСНИХ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМАХ

1.1 Основні концепції проектування мультисервісної інформаційної системи

1.1.1 Основні функції мультисервісної інформаційної системи

Для забезпечення високої ефективності управління на промислових підприємствах та у великих логістичних і транспортних компаніях сьогодні широко застосовуються автоматизовані системи керування. Ці системи інтегрують інфокомунікаційні технології, які відіграють ключову роль у вдосконаленні процесів управління. Використання інфокомунікаційних систем сприяє значному покращенню процесів передачі та обробки інформації, забезпечуючи її оперативне надання користувачам. Також, ці системи гарантують повноту, точність і необхідний обсяг інформації, а також її доступність, безпеку та конфіденційність [7, 8]. Внаслідок цього, підприємства здатні швидко реагувати на зміни в умовах ринку та оптимізувати свою діяльність в реальному часі.

Сучасні інфокомунікаційні системи, як правило, створюються на основі мультисервісних інформаційних систем (МІС), які служать критичною інфраструктурою для адміністративного управління діяльністю підприємств. Такі системи не тільки вдосконалюють внутрішні операції, але й забезпечують необхідні умови для взаємодії між філіями компанії, сприяючи обміну інформацією та ресурсами між різними відділами [7, 8]. Це, в свою чергу, підвищує ефективність загальних бізнес-процесів та сприяє кращій координації [7, 8].

МІС є невід'ємною частиною критичної інфраструктури організації, оскільки їх основна задача полягає у забезпеченні стабільного та ефективного зв'язку. Ці системи повинні функціонувати безперебійно, незалежно від

зовнішніх викликів, таких як техногенні катастрофи, кібератаки, а також різні технічні збої. Їх важливість зумовлена необхідністю постійного і надійного доступу до інформації, що критично для управління діяльністю підприємства та підтримки його операцій у нормальних і надзвичайних умовах. Забезпечення безпеки та стійкості цих мереж перед потенційними загрозами є ключовим фактором для підтримки безперервності бізнесу та захисту корпоративних даних.

Зазвичай на великих підприємствах корпоративні мультисервісні інформаційні системи (MIS) розгортаються як просторово розподілені системи, що надають користувачам різноманітні комунікаційні послуги з гарантованою якістю обслуговування (Quality of Service - QoS) та класом обслуговування (Class of Service - CoS). До основних послуг, які надаються через ці системи, відносяться IP-телефонія, електронна пошта, обмін файлами, аудіо та відеоконференцзв'язок. Також MIS включають системи для передачі управлінської інформації, організоване зберігання та пошук у великих масивах дистрибутивних даних, а також заходи, спрямовані на забезпечення конфіденційності інформації в мережі. Така інфраструктура відіграє ключову роль у підтримці ефективності та безпеки корпоративної комунікації [7].

Слід зазначити, що залежно від призначення, MIS можуть застосовуватися для контролю технічного стану та управління різних технічних засобів, які забезпечують виконання бізнес-процесів підприємства.

1.1.2 Мультисервісна інформаційна система, як об'єкт управління

На сьогоднішній день, еволюція та ефективна експлуатація автоматизованих організаційно-технічних систем управління супроводжується постійно зростаючим попитом на послуги електрозв'язку з гарантованою якістю. Ці послуги є вирішальними для забезпечення надійності та швидкості реагування систем, що є ключовими факторами їхньої ефективності. Це пояснюється існуючими вимогами щодо оперативності

обробки різної ієрархії управлінських рішень, при цьому необхідно забезпечити безпеку інформації, що обробляється, точність її обробки, об'єктивність прийняття управлінських рішень, своєчасність їх доведення до виконавця, а також здійснити контроль їх виконання. Крім цього, висока якість послуг зв'язку потрібна для забезпечення нормального функціонування різних просторово розподілених радіотехнічних систем і систем радіозв'язку [9].

Мультисервісна інформаційна система є складною системою, і для ефективного управління нею потрібна стратегія та використання різноманітних інструментів. Ось деякі ключові аспекти управління мультисервісною інформаційною системою:

1. *Моніторинг та діагностика:* Наявність систем моніторингу, які стежать за роботою мережі в режимі реального часу, дозволяє виявляти проблеми швидко та ефективно. Діагностичні засоби допомагають ідентифікувати причини перебоїв та забезпечують швидке виправлення.

2. *Управління ресурсами:* Ефективне розподілення та використання мережевих ресурсів, таких як пропускна здатність, буфери, і обчислювальні потужності, є важливим аспектом. Системи управління ресурсами можуть оптимізувати використання мережевих компонентів.

3. *Безпека:* Забезпечення високого рівня безпеки мережі є критичним. Інтеграція систем захисту, таких як файрволи, антивірусні програми, та системи виявлення вторгнень, допомагає захищати мережу від потенційних загроз.

4. *Управління персоналом:* Тренінг та навчання персоналу щодо ефективного використання системи та її ресурсів, а також вміння реагувати на можливі проблеми, є важливим елементом управління мультисервісною системою.

5. *Управління змінами та апгрейдами:* Планування та впровадження змін до системи, включаючи апгрейди обладнання та програмного забезпечення, повинно бути здійснене стратегічно та з урахуванням мінімізації можливих впливів на бізнес-процеси.

6. *Моніторинг трафіку та аналіз даних:* Збір та аналіз трафіку допомагають визначати патерни використання мережі, виявляти потреби в розширенні пропускнуої здатності та удосконаленні сервісів.

7. *Управління витратами:* Ефективне управління фінансами та витратами на інфраструктуру забезпечує ефективне використання ресурсів.

8. *Інтеграція хмарних технологій:* Розгляд можливостей інтеграції хмарних рішень для забезпечення більшої гнучкості та масштабованості.

Системоутворюючою основою автоматизованої системи управління компаній є мультисервісна інформаційна система. Зазвичай основними особливостями МІС є великий географічний і просторовий розмах, велика кількість різнорідних абонентів, яким потрібні різні послуги зв'язку із заданими характеристиками за умов експлуатації цієї системи. У процесі експлуатації МІС можливі динамічні випадкові зміни як топології МІС, і складу її технічних засобів, і навіть заздалегідь невідомого числа абонентів. Крім цього, МІС повинна мати можливість взаємодії та поєднання з іншими МІС (наприклад, з мережами інших операторів зв'язку чи установ). Технічно МІС реалізована як пакетна мультисервісна мережа зв'язку, створена та функціонує на основі стеку протоколів TCP/IP/MPLS.

Зазвичай МІС складається із сукупності локальних обчислювальних мереж користувачів (LAN), які об'єднують у єдину систему глобальних мереж зв'язку (WAN).

Технічною основою МІС є функціонально структурована сукупність вузлів комутації пакетів (маршрутизаторів), швидкісних каналів зв'язку, серверів послуг та сервісів, а також автоматизованої системи управління зв'язком (АСУЗ). Узагальнена функціональна структура МІС наведена на рисунку 1.1.

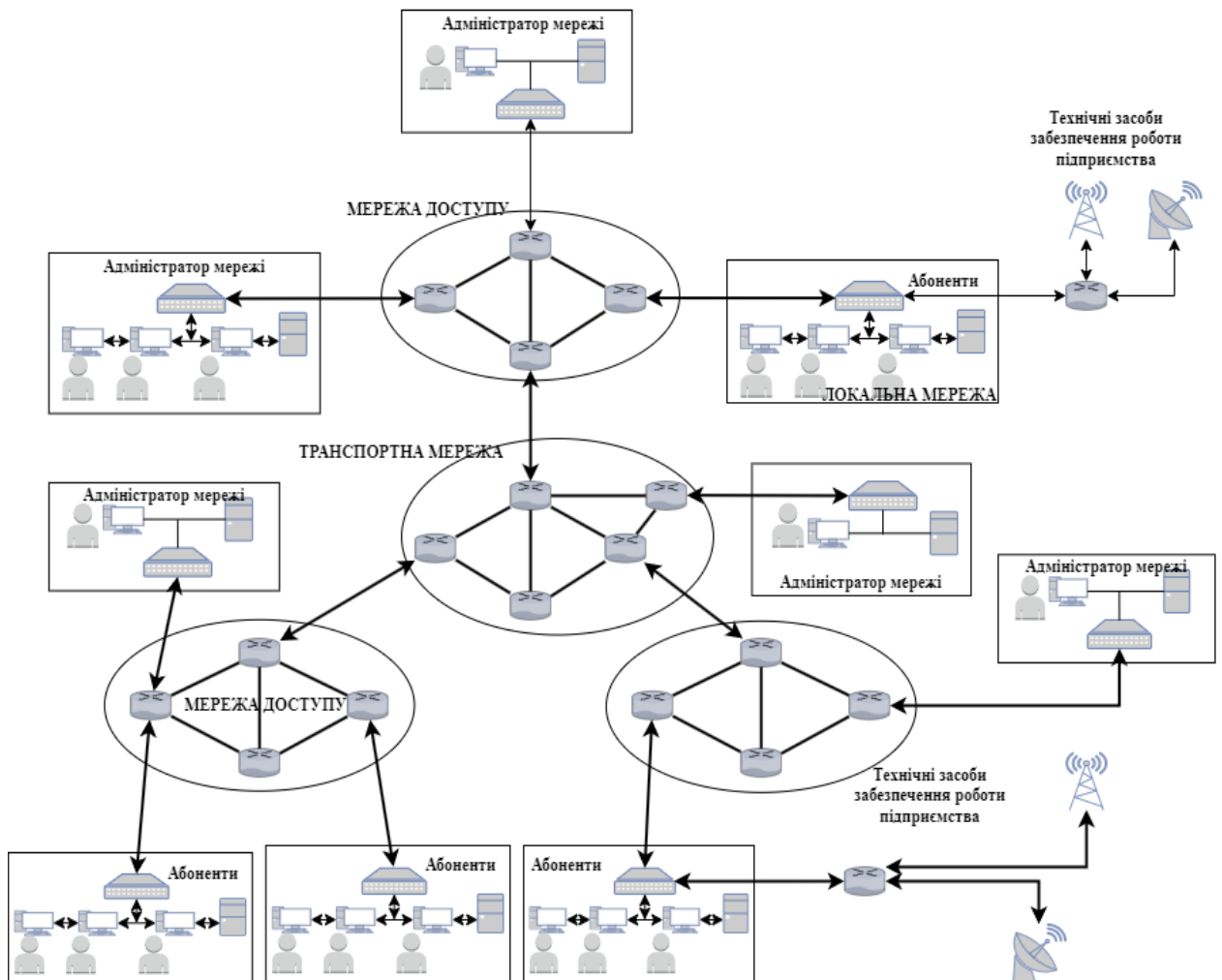


Рисунок 1.1 – Узагальнена функціональна структура МІС

До основних послуг зв'язку, що надаються МІС абонентам, слід віднести:

- голосовий зв'язок: надання послуг голосового зв'язку, таких як стаціонарні та мобільні телефонії, віртуальні номери, конференц-звіти та інші.
- інтернет-послуги: забезпечення широкосмугового доступу до Інтернету для користувачів офісів та філій компанії.
- віртуальна приватна мережа (VPN): надання безпечних та приватних з'єднань між різними відділеннями компанії(філіями) через публічні мережі.
- відеоконференції та віртуальні мітинги: забезпечення можливості віддаленого спілкування за допомогою відео для покращення комунікації між віддаленими співробітниками.
- хостинг та колокація: надання послуг зберігання даних, хостингу веб-сайтів та інших обчислювальних ресурсів в дата-центрах.

- інтеграція з технологіями інформаційної безпеки: захист інформації та даних за допомогою різних інструментів, таких як фаєрволи (брандмауери), антивірусні програми, системи виявлення вторгнень та шифрування.

- обліково-фінансові системи: використання мережі для передачі фінансових даних, електронного обліку, онлайн-платежів та інших фінансових операцій.

- Інтернет речей (IoT) та збір, аналіз даних: підключення та управління пристроями Інтернету речей, а також аналіз зібраних даних для прийняття рішень.

- служби віртуальної приватної АТС (VPBX): використання хмарних технологій для надання послуг телефонії та обслуговування дзвінків без необхідності великої фізичної інфраструктури.

Архітектурні принципи побудови МІС, ґрунтуються на концепціях мереж зв'язку наступного покоління Next Generation Network (NGN) та IP Multimedia Subsystem (IMS) [10-12].

Мультисервісні інформаційні системи являють собою пакетні мережі зв'язку, створені з урахуванням стека протоколів TCP/IP/MPLS, які інтегрують різні послуги зв'язку [10 - 13].

Мультимедіа-підсистема IP (IMS) - це набір специфікацій, що описує мережеву архітектуру нового покоління для впровадження IP-телефонії та мультимедійних послуг. Ці технічні характеристики визначають повну структуру та архітектуру, яка дозволяє зближувати технології відео, голосу, даних та мобільних мереж [14]. Основним призначенням IMS є забезпечення взаємодії мереж різного типу, можливість масштабування продуктивності мереж зв'язку.

З погляду користувачів, МІС повинна забезпечувати оперативність надання послуг зв'язку, доступність абонентів системи до послуг зв'язку, безпеку і захист мережевої інформації, стійкість свого функціонування в різних умовах експлуатації, забезпечувати необхідну якість послуг зв'язку користувачам, що надаються [13].

МІС, у загальному випадку, до свого складу включає об'єктові мережі підприємства, одну або кілька мереж доступу [13]:

Мережа зв'язку, що забезпечує підключення абонентського обладнання в точці доступу до послуг зв'язку, називається мережею доступу (access network) [13 - 15]. Вона забезпечує зв'язність абонентів та мережеву масштабованість. Зазвичай мережа доступу МІС має систему управління зв'язком (АСУЗ), яка керує конфігуруванням мережевих елементів, проводить моніторинг їх технічного стану з метою швидкого виявлення різноманітних несправностей.

Як приклад на рисунку 1.2 представлена структура мереж доступу [7, 13-15].

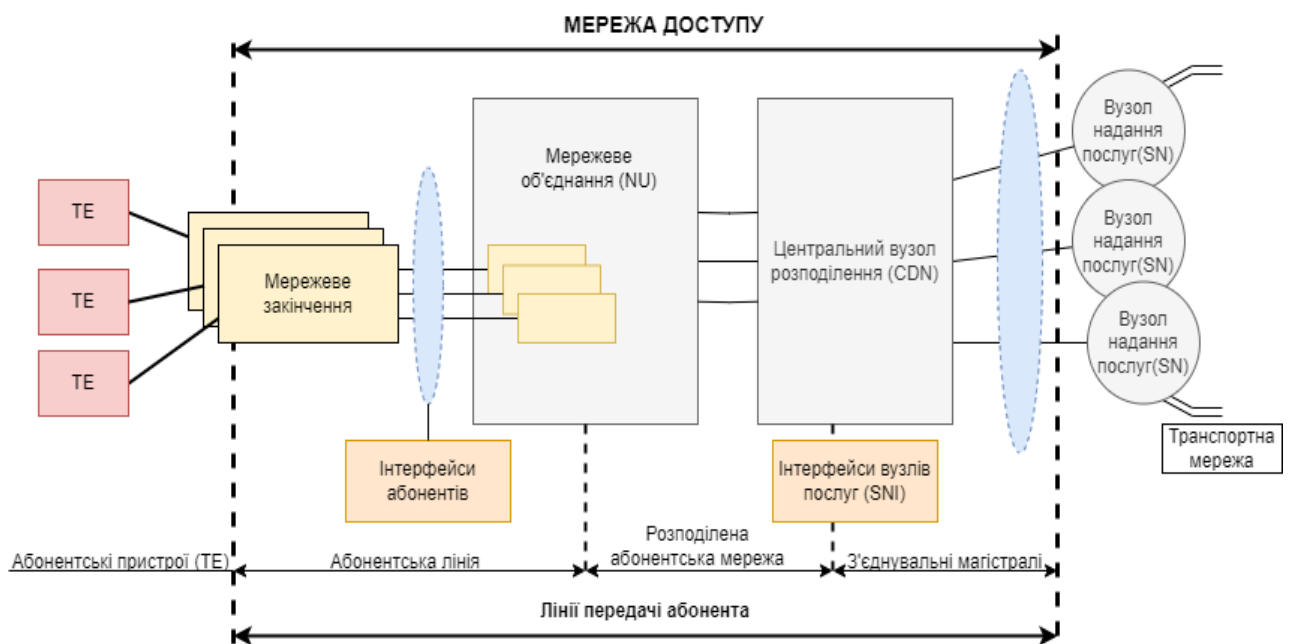


Рисунок 1.2 - Базова структура мереж доступу

До складу транспортної мережі МІС можуть входити магістральні та регіональні мережі. Складова частина транспортної мережі, що надає послуги зв'язку абонентам, що у межах одного регіону, називається регіональною мережею зв'язку. Складова частина транспортної мережі, що реалізує

перенесення трафіку між регіональними мережами, називається магістральною мережею [15].

У транспортній мережі МІС можуть застосовуватись різні технології, наприклад, такі як технології плезіохронної цифрової ієрархії (ПЦІ, PDH), синхронної цифрової ієрархії (СЦІ, SDH), хвильового мультиплексування (Wave Division Multiplexing – WDM), грубого спектрального мультиплексування (Coarse Wave Division Multiplexing – CWDM), ущільненого хвильового мультиплексування (Dense Wave Division Multiplexing – DWDM), технології багатопроTOCOLЬНОЇ комутації за допомогою міток (MultiProtocol Label Switching – MPLS) та технології протоколів TCP/IP [15 – 16]. Застосування різних технологій або їхнє спільне застосування визначається наявністю відповідного середовища передачі сигналів, а також функціональними вимогами та економічними обмеженнями [16].

Побудова та функціонування МІС визначається на основі функціональної та технологічної архітектур [15, 16].

Сукупність логічно пов'язаних функціональних елементів та підсистем, що визначають принципи побудови та функціонування МІС, становить її функціональну архітектуру (рисунок 1.3) [16].



Рисунок 1.3 – Функціональна архітектура МІС

Функціональні підсистеми та елементи МІС забезпечують надання необхідного абонентам системи переліку послуг та сервісів зв'язку, уніфікацію мережних рішень, інтеграцію з існуючими послугами зв'язку, а також забезпечують мультисервісність послуг зв'язку, що надаються [15, 16].

Сукупність ієрархічної системи телекомунікаційних протоколів, логічних інтерфейсів, і набір функціонально – логічних зв'язків і створює технологічну архітектуру МІС. Технологічна архітектура встановлює правила надання абонентам послуг зв'язку з необхідною якістю, передачі мережевого трафіку, взаємодії абонентів. Технологічна архітектура МІС також визначає правила взаємодії МІС з іншими мережами зв'язку [15, 16].

Процес управління мережею зв'язку включає всі дії, що відносяться до планування, розробки та спорудження, а також до експлуатації мережі, що роблять ефективним використання мережних ресурсів, обслуговуючого

персоналу, мережевого обладнання, споруд, засобів обчислювальної техніки, каналів зв'язку, за відповідної необхідної якості послуг зв'язку, що надаються абонентам мережі [17, 18].

1.1.3 Аналіз вимог до управління мультисервісною інформаційною системою

АСУЗ МІС виконує функції адаптації мережі до можливих непередбачених ситуацій, що виникають під час експлуатації [17, 18]. Причинами непередбачених ситуацій можуть бути неточність завдання вихідних даних при проектуванні мережі, різного роду неточності та невизначеності даних мережного моніторингу, а також нестаціонарність і нелінійність фізичних та інформаційних процесів в системі [17, 18]. При штатному режимі функціонування МІС її автоматизована система управління повинна забезпечувати максимальне використання надмірності апаратно - програмних засобів мережі з метою забезпечення та можливого збільшення показників ефективності її функціонування [16 - 18].

Основне призначення АСУЗ діючої мережі зв'язку полягає у досягненні та забезпеченні оптимальних значень характеристик її функціонування чи значення основного критерію оцінки роботи мережі у процесі заданого періоду експлуатації [17, 18]. Слід зазначити, що мережі зв'язку умовно можна розділити на дві категорії. До першої категорії належать мережі, основним призначенням яких є отримання комерційної вигоди. До таких мереж належать мережі операторів зв'язку, мережі провайдерів, мережі операторів стільникового зв'язку тощо. Подібні мережі належать до категорії прогресуючих мереж. Іншою великою категорією є стагнуючі мережі, основним призначенням яких є виконання своїх функцій щодо надання послуг зв'язку абонентам з метою реалізації ними своїх бізнес-процесів [19]. До таких мереж відносяться, наприклад, відомчі мережі, корпоративні мережі, мережі органів адміністративних та муніципальних органів управління тощо. Задля

забезпечення функціонування мереж зв'язку другого типу з необхідною якістю необхідно вкладення відповідних ресурсів [18, 19]. Відповідно, різні типи мереж можуть мати різні критерії функціонування. Якщо для першого типу може бути достатнім виконання рівності значення деякого критерію в середньому, то для другого типу мереж може знадобитися безумовне його виконання [18, 19].

АСУЗ МІС є накладеною на керовану мережу зв'язку обчислювальну мережу [16 - 18]. Узагальнена структура АСУЗ МІС представлена рисунку 1.4.

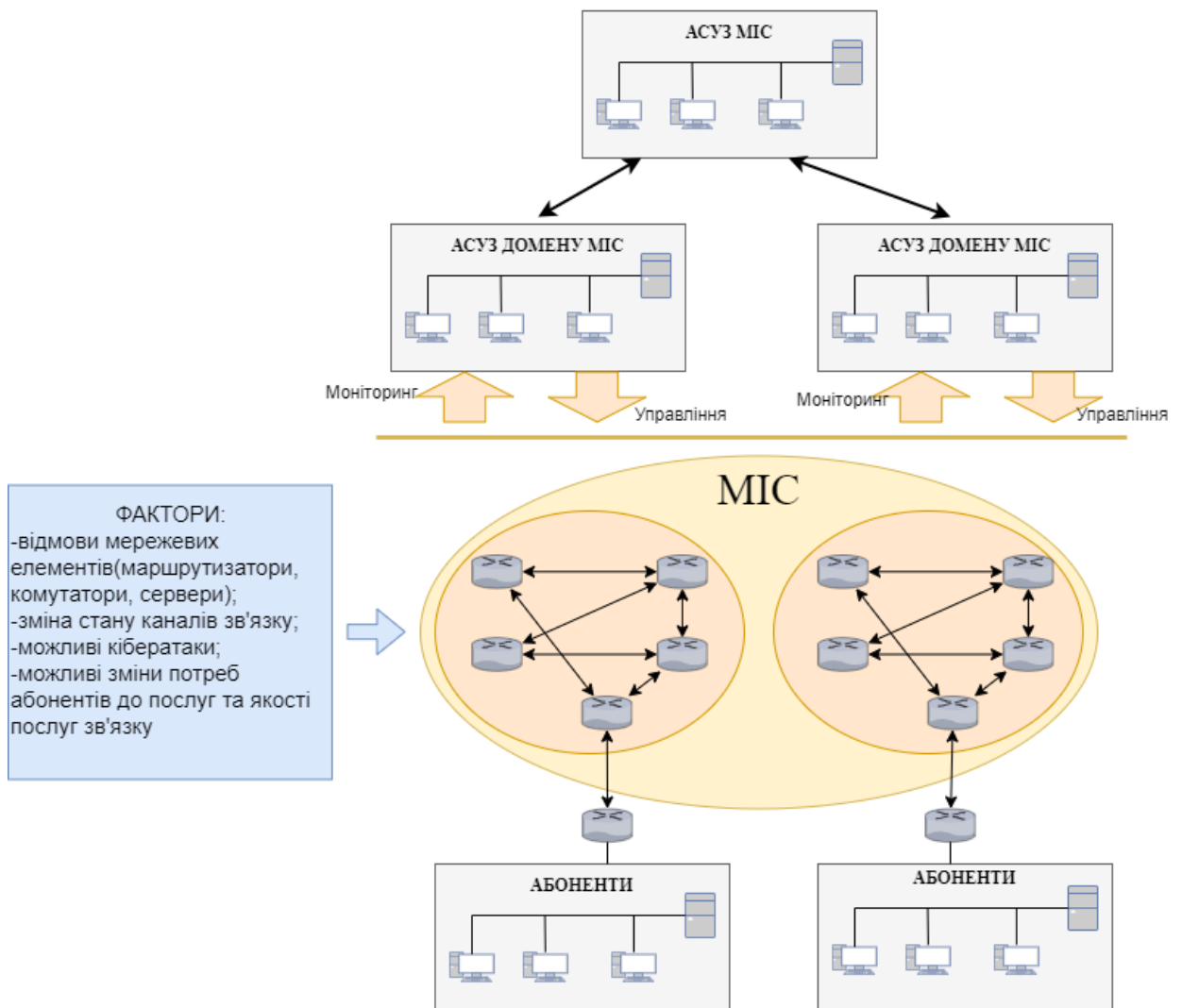


Рисунок 1.4 – Узагальнена структура АСУЗ МІС

У процесі функціонування системи можливі дії деструктивних чинників. До таких деструктивних факторів можна віднести технічні відмови мережевих елементів, зміни технічного стану каналів зв'язку, внаслідок чого може змінюватися їхня пропускна здатність, можливі різного роду кібератаки. Крім цього, в мережі, що нормально функціонує, можливі зміни вимог абонентів по номенклатурі та якості послуг зв'язку, що надаються, що призводить до апріорі невідомих перерозподілів мережевих ресурсів [17 - 19]. АСУЗ МІС має мінімізувати дії факторів, що викликають зміни технічного стану мережі зв'язку та їх негативний вплив на якість послуг зв'язку, що надаються [17, 18]. АСУЗ мультисервісної інформаційної системи має таку особливість. Сама мультисервісна інформаційна система створюється як єдина система, що надає абонентам мережі різноманітні послуги зв'язку із заданою якістю, які використовують єдині мережеві та обчислювальні ресурси. Відповідно, управління МІС є сукупність процесів розподілу та перерозподілу єдиних мережевих та обчислювальних ресурсів між необхідними абонентам послугами зв'язку з необхідною якістю [18, 19].

Єдина АСУЗ МІС створюється, розвивається та модернізується на основі еволюційного принципу, поетапно, на основі концепції відкритих систем, на основі вітчизняних та міжнародних стандартів [20 – 26]. Технологічно застаріле обладнання підключається до сучасної АСУЗ за допомогою різноманітних узгоджувальних пристроїв (мережевих адаптерів) [23- 26].

Основним завданням при створенні АСУЗ МІС є завдання розробки додатків, що дозволяють керувати системою, які є сукупністю узгоджених математичних та інформаційних моделей керованих мережевих об'єктів, а також сукупність алгоритмів, призначених для виконання розрахунків мережевих характеристик [2, 18, 27].

Таким чином, АСУЗ МІС є набіром служб, реалізованих за допомогою програмно – апаратних засобів, які надають адміністрації мережі інформацію

про її технічне та функціональний стан і реалізують можливість автоматизовано або в автоматичному режимі впливати на її роботу [27 - 28].

Структура циклу управління мережею представлена рисунку 1.5 [17].



Рисунок 1.5 – Структура циклу управління МІС

Основними етапами управління мережею є:

- збір інформації про стан мережі та мережевих елементів;
- аналіз якісних та кількісних характеристик функціонування МІС на їх відповідність запитам абонентів;
- розробка об'єктивних керуючих рішень;
- реалізація прийнятих керуючих рішень через відповідні апаратно – програмні засоби та протоколи інформаційної взаємодії;
- здійснення контролю реалізації управляючих рішень.

Управління мережею зв'язку носить дискретний характер, суть якого полягає в тому, що керуючі системи здійснюють зміни характеристик і параметрів мережі при досягненні значень цими показниками деяких порогів [17, 18]. Як правило, реакція АСУЗ на можливі деструктивні прояви в роботі мережі (перевантаження, відмови обладнання, можливі дії кібератак тощо)

відбуватиметься з деякою часовою затримкою, причинами якої можуть бути великий просторовий розмах розташування мережевих елементів, необхідність забезпечення достатньої репрезентативності статистичних характеристик роботи мережі і так далі. Якщо ця часова затримка перевищуватиме час зміни стану мережевих елементів, то керуючі впливи будуть неадекватними, тобто процес управління мережею буде порушено [18].

АСУЗ МІС створюється та функціонує як ієрархічна система, яка має як функціональну, так і рівневу декомпозицію [17, 20 – 24]. Кожен рівень ієрархії включає свої центри управління мережею зі своїми функціональними завданнями. Враховуючи різноманіття фізичних, функціональних та інформаційних процесів, що протікають у мережі, їх великі розмірності, зростаючі динамічні показники зміни мережевого стану, для підвищення оперативності та якості прийняття управлінських рішень в АСУЗ МІС повинні бути підсистеми оперативної підтримки прийняття рішень, що функціонують на основі методів штучного інтелекту [2, 9].

1.1.4 Основні підходи та інноваційні технології управління інформаційними системами

Мультисервісна інформаційна мережа є великою, складною системою, в якій протікає значна кількість різних за своєю суттю фізичних, функціональних та інформаційних процесів. Для управління інформаційною мережею як єдиним об'єктом було створено концепцію ієрархічного управління телекомунікаціями. Основні її положення викладено у рекомендаціях серії М.3000 ІТУ-Т [20 - 23]. Наприклад, рекомендація М.3010 [20] визначає, що для управління мультисервісною інформаційною мережею застосовується окрема мережа зв'язку (виділена або накладена) (Telecommunication Management Network, TMN). Мережа TMN має інтерфейси для обміну даними з однією або декількома мережами зв'язку та з її допомогою реалізується керування їх роботою. Мережа TMN служить для управління

телекомунікаційними і мережевими ресурсами керованої мережі. До подібних керованих ресурсів відносяться канали зв'язку, їх кількість, параметри та характеристики (пропускна здібність, технічний та функціональний стани, фізична та логічна зв'язності тощо), стан комутуючого обладнання (маршрутизатори, комутатори, кросове обладнання тощо) , засоби обчислювальної техніки, сервера послуг, сервера адресації, сервера мережевої та інформаційної безпеки тощо. [17, 18, 27, 28]. У більшості випадків для свого функціонування TMN використовують існуючу інфраструктуру та ресурси керованої мережі зв'язку [27, 28].

У моделі TMN керовані об'єкти називаються мережними елементами (Network Element , NE). Управління мережею здійснюють системи підтримки операцій (Operations Support System, OSS), які також називають операційними системами (Operations System, OS) [7, 17, 18, 27, 28]. У моделі TMN присутні фізична, функціональна та інформаційна архітектура [2, 7, 17, 18, 27].

Функціональна архітектура мережі TMN. Дана архітектура описує розподіл функцій між різними блоками для передачі і обробки інформації, що відноситься до управління телекомунікаційними системами і мережами та послугами мереж в штатних і надзвичайних ситуаціях[17]. Обмін інформацією між функціональними блоками відбувається через відповідні інтерфейси або контрольні точки [2, 7, 17, 27, 28]. Інформаційна архітектура моделі TMN регламентує правила взаємодії агентів та менеджерів [27].

Менеджери (М) - програмна логіка (керуюча програма) або частина прикладної функції управління (ПФУ), яка здатна видавати операцію мережевого управління (наприклад, робити вибірку записи аварійної події, встановлювати граничні значення) і отримувати інформацію про аварії і про робочі характеристики.

Агенти (А)- Програмна логіка (програми моніторингу стану і контролю ресурсів) представляє частину ПФУ, яка здатна здійснювати відгук на операції мережевого управління, що видаються менеджером, і виконувати операції з

керуваними об'єктами, видаючи події від імені керованих об'єктів. Ця логіка має наступні можливості [17]:

1. Здатність впливати на ресурси/можливості об'єкта, згідно з отриманими від менеджера командам.
2. Постійно відслідковувати стан керованого об'єкта (моніторинг).
3. Видача повідомлень.
4. Сприяння в обміні інформацією між керованими об'єктами різних рівнів.

Один менеджер може обмінюватися інформацією з декількома агентами, і один агент - з кількома менеджерами. Менеджер може грати роль агента по відношенню до менеджера вищого рівня. У будь-якому випадку менеджер повинен активізувати процеси управління і бути підготовленим до управління негативними відгуками (через захисту інформації від несанкціонованого доступу). Агент повинен фільтрувати директиви управління і транслювати відповідні повідомлення.

Весь обмін інформацією між агентом і менеджером відбувається за допомогою **протоколу взаємодії**, який визначає черговість і форму обміну керуючими командами. Це протокол взаємодії CMIP (Common Management Information Protocol) і інформаційного сервісу загальної керуючої інформації CMIS (Common Management Information Service). Схема взаємодії між агентом, менеджером і об'єктом приведена на рисунку 1.6

Менеджер реалізує частину розподіленого процесу управління, основними функціями якого є передачі команд управління на мережеві елементи та збору підтверджень про їх реалізацію [7, 22 – 24]. Агент виконує команди, які від менеджера, і навіть інформує менеджера про функціонування мережевих елементів [2, 22 - 27]. Один менеджер може управляти групою агентів. Один агент також може взаємодіяти з групою менеджерів [22 - 27]. Правила взаємодії агентів із мережевими елементами не стандартизовані [29 – 31].

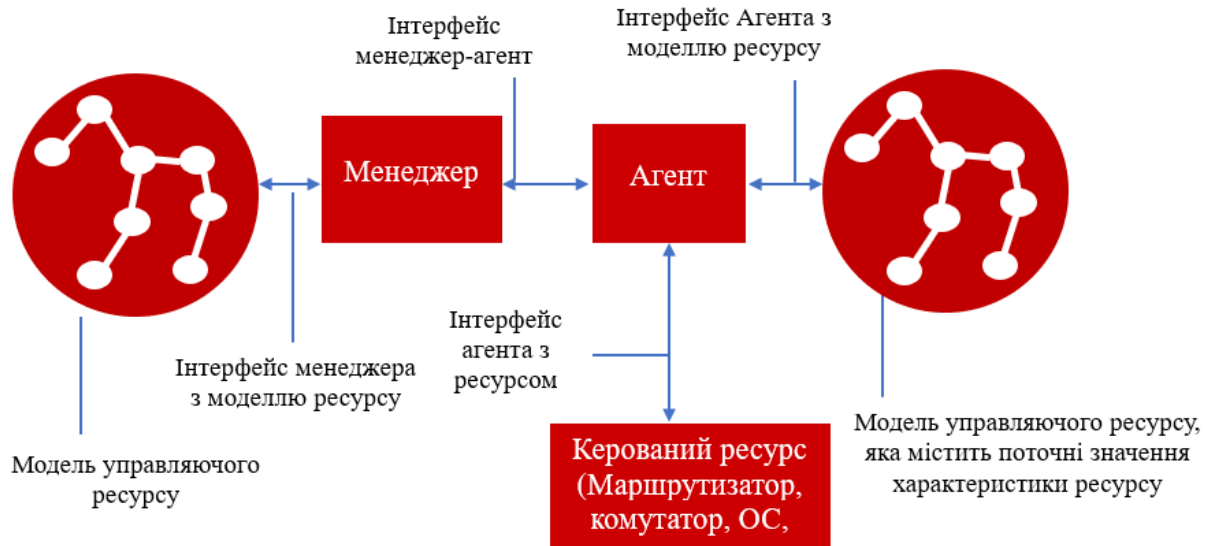


Рисунок 1.6 – Структура взаємодії «агент-менеджер»

За підсумками взаємодії «агент - менеджер» можна створювати як однорангові системи управління, і ієрархічні системи. Приклад ієрархічної системи взаємодії «агент - менеджер» наведено рисунку 1.7 [7, 27 - 31].

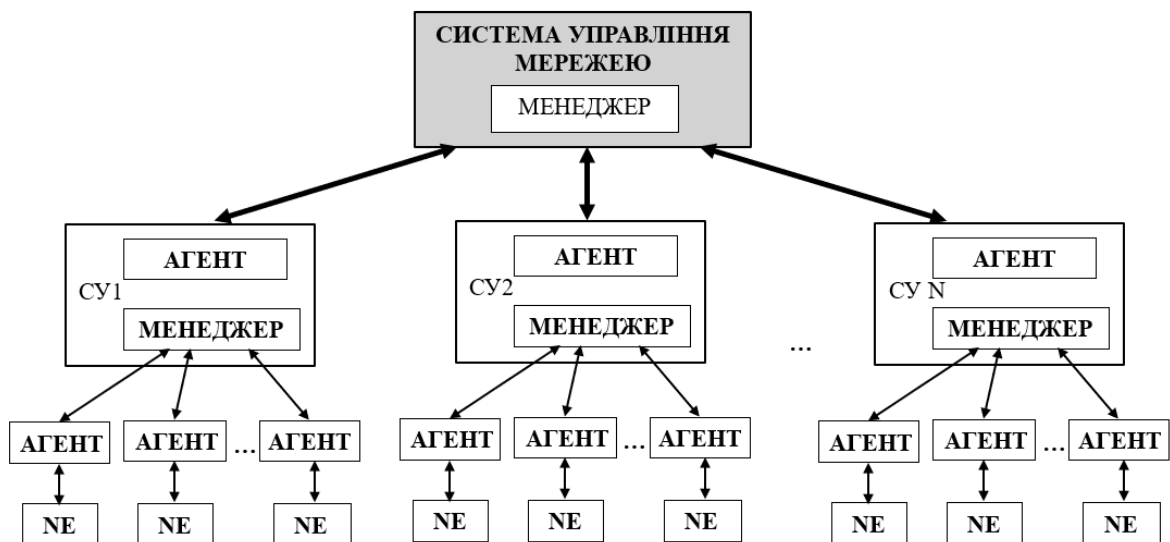


Рисунок 1.7 – Ієрархічна система взаємодії «агент-менеджер»

TMN реалізує принцип ієрархічного управління мережами зв'язку. Це впливає з логічної ієрархічної архітектури моделі TMN (Logical Layered Architecture, LLA), яка має п'ять ієрархічних рівнів управління [17, 22, 29].

Відповідність видів управління моделі TMN за рівнями та стандартами, яким відповідає АСУЗ МІС, наведено на рисунку 1.8 [17, 22, 29].

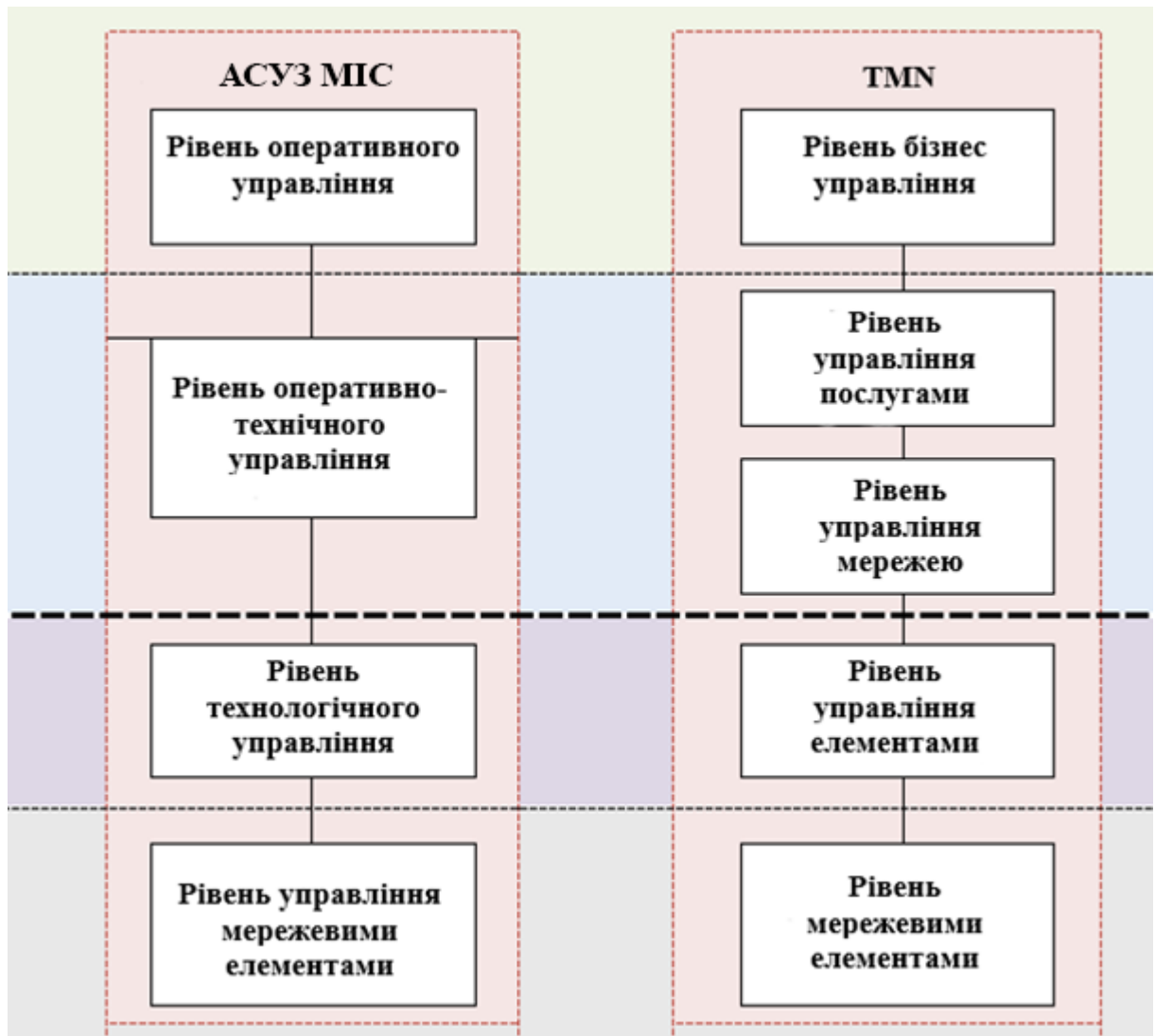


Рисунок 1.8 – Ієрархія рівнів управління АСУЗ МІС та моделі TMN

Рівень бізнес-управління (Business Management Layer, BML) моделі TMN визначає перспективні, стратегічні бізнес-цілі розвитку та управління мережею зв'язку. Цей рівень відповідає за вирішення завдань проектування, створення та перспективного розвитку мережі зв'язку. На цьому рівні вирішуються завдання і визначаються правила взаємодії з абонентами мережі. Тут же формуються цільові завдання для рівнів управління нижчих ланок [17,

22, 29]. Цьому рівню в АСУЗ МІС відповідає рівень оперативного управління (ОУ).

Рівню оперативно-технічного управління (ОТУ) в АСУЗ МІС відповідають рівні управління послугами та управління мережею. На цих рівнях аналізуються дані, що надходять із нижніх рівнів управління. Виконується розподіл та перерозподіл мережевих ресурсів, здійснюється контроль якості послуг зв'язку (QoS , CoS), а також виконуються операції обліку [17]. На оперативно-технічному рівні проводиться керування всією мережею. Дані мережного моніторингу передаються OSS із нижнього ієрархічного рівня управління. У цьому рівні управління контролюються процедури взаємодії мережевих елементів, визначаються маршрути передачі, контролюється технічний стан мережі зв'язку. Виконується контроль якості послуг зв'язку [17, 22, 29]. На цьому рівні виконується керування всіма мережевими об'єктами, класифікація яких наведена на рисунку 1.9.

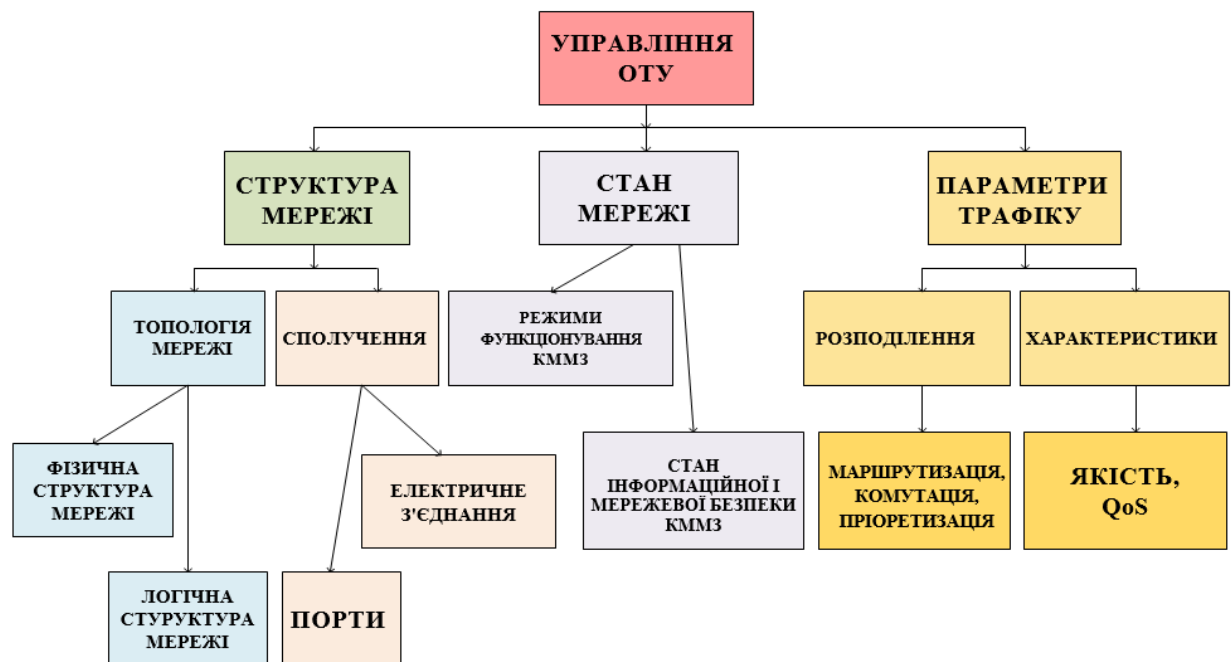


Рисунок 1.9 – Основні об'єкти управління у МІС

Рівню технологічного управління мережею (ТУ) в АСУЗ МІС відповідає рівень управління елементами (Element Management Layer, EML) моделі TMN. Він забезпечує виконання функцій системами підтримки операцій [32 –

37]. На цьому рівні реалізується керування конкретним мережевим обладнанням.

Управління інформаційною безпекою МІС здійснюється на рівнях ОТУ, ТУ та рівні управління елементами (PUE) моделі TMN [17, 35, 36]. Це дозволяє реалізувати єдине управління мережею, яке є результатом вирішення завдання багатокритеріальної оптимізації [24, 32, 34].

1.2 Аналіз методів та технологій, які забезпечують якість послуг зв'язку в мультисервісних інформаційних мережах

Властивості послуги, які визначають здатність задовольняти потреби абонента мережі зв'язку, називаються її якістю [35 – 37]. Воно залежить від якостей функціонування та управління мережею [37]. Вирішення завдання забезпечення необхідної якості послуг є однією з основних цілей розробки та створення будь-якої мережі зв'язку [35 – 37].

Якість послуг зв'язку включає якість функціонування мережі та якість обслуговування (Quality of Service, QoS) [35 – 37].

Якість функціонування мережі зв'язку визначається параметрами обробки та перенесення трафіку, наявністю ресурсів зв'язку, показниками технічного стану мережного обладнання та параметрами передачі контенту користувача, а також параметрами та характеристиками мережевого управління, яке підтримує основні мережеві показники в необхідних межах [35 – 37].

QoS визначається у точці доступу до послуги. Основні характеристики послуг зв'язку представлені у таблиці 1.1 [37].

Критерії нормування параметрів якості послуг у мережах TCP/IP визначено у МСЕ-Т Y.1540 та Y.1541 [40 - 42]. У Y.1540 визначено перелік параметрів, що застосовується для класифікації трафіку (таблиця 1.2).

ВУ.1541 визначено значення параметрів трафіку для різних класів обслуговування, а також визначено відповідність між класами QoS та додатками (таблиця 1.3) [37 - 41].

Таблиця 1.1 - Основні характеристики послуг зв'язку

Параметри мережі	Характеристики параметрів послуг зв'язку
Забезпеченість	Потенційна можливість надання користувачеві необхідного набору послуг.
Зручність використання	Визначає, наскільки успішно споживач може використовувати даний вид послуг (або послуги)
Дійсність	Послуга зв'язку надається, коли це необхідно абоненту та продовжується без значного погіршення якості протягом необхідного абоненту часу.
Безпека	Захист від несанкціонованого доступу, використання не за призначенням, спотворення чи інших деструктивних зовнішніх впливів.
Доступність	Послуга зв'язку надається, коли це необхідно.
Безперервність	Можливість продовжувати послугу протягом необхідного абоненту часу.
Цілісність	Можливість послуги зв'язку не погіршувати своєї якості в період обслуговування абонента.

Таблиця 1.2 – Визначення параметрів оцінки якості послуг

Параметр	Визначення
Затримка доставки IP пакетів – IPTD (IP packet transfer delay)	Час доставки пакета між джерелом та одержувачем для всіх пакетів
Варіація часу затримки IP пакетів - IPDV (IP packet delay variation)	Середня зміна затримки передачі IP пакетів у мережі (джиттер)

Коефіцієнт втрат IP пакетів – IPLR (IP packet loss ratio)	Відношення числа втрачених пакетів до загального числа прийнятих пакетів у вибраному наборі переданих та прийнятих пакетів
Коефіцієнт помилок IP пакетів – IPER (IP packet error ratio)	Відношення числа пакетів, прийнятих з помилками, до загального числа прийнятих пакетів у вибраному наборі переданих та прийнятих пакетів

Таблиця 1.3 - Класи QoS

Характеристики	Клас якості обслуговування					
	0	1	2	3	4	5
IPTD - затримка IP-пакетів	100 мс	400 мс	100 мс	400 мс	1 с	нн
IPDV - варіація затримки IP-пакетів (джиттер)	50 мс	50 мс	нн	нн	нн	нн
IPLR - коефіцієнт втрат IP-пакетів	1×10^{-3}					нн
IPER - коефіцієнт помилок IP-пакетів	1×10^{-4}					нн

Примітка

нн не нормовано

клас 0 програми реального часу, чутливі до джиттера затримки (VoIP, відеоконференції);

клас 1 додатки реального часу, чутливі до джиттера затримки (VoIP, відеоконференції);

клас 2 транзакції даних, чутливі до джиттеру затримки (сигналізація, управління);

- клас 3 транзакції даних, інтерактивні програми;
- клас 4 програми, що допускають низький рівень втрат (короткі транзакції, масиви даних, потокове відео);
- клас 5 - традиційні застосування IP-мереж.

Показники QoS мультимедійного трафіку включають показники якості процесу встановлення з'єднання і якості самого з'єднання [37].

Властивість МІС, що визначає здатність мережі виконувати свої функції при дії зовнішніх та внутрішніх деструктивних факторів (ДФ) на мережу, називається стійкістю [35, 42, 43].

До внутрішніх ДФ належать технічні відмови мережного устаткування, і навіть ліній і каналів зв'язку МІС. Зовнішні ДФ - це чинники, що призводять до втрати працездатності мережі, що впливають на мережу зв'язку із зовнішнього по відношенню до неї середовища [35 - 37, 43]. Надійністю МІС називається здатність мережі виконувати свої функції за умов впливу на мережу внутрішніх ДФ [42, 43].

Стойкість мережі зв'язку забезпечується за допомогою введення надмірності мережевих ресурсів [42, 43].

У багатьох МІС застосовуються зв'язкові технології з урахуванням стека протоколів TCP/ IP/ MPLS. Основою цього стека служить протокол IP, що є протоколом мережного рівня та реалізує дейтаграмну передачу даних [38, 44]. Опис протоколу IP представлено у стандартах RFC [27, 38, 44].

Протокол IP забезпечує передачу пакетів у складових, гетерогенних мережах зв'язку [27, 38]. Він не забезпечує гарантовану доставку пакетів абонентам. Протокол IP немає механізмів забезпечення якості обслуговування [27, 38]. У протоколі IP не реалізовано можливості керування потоками даних, виправлення помилок, а також у ньому відсутня можливість відновлення пропущених пакетів. Вирішення цих завдань реалізується протоколами транспортного рівня TCP (Transmission Control Protocol) та UDP (User Datagram Protocol) [38]. Крім цього, маршрутизація IP-пакетів досить складна

алгоритмічно, що може викликати зниження продуктивності в роботі комутуючих пристроїв [27, 37, 38].

Таким чином, обмежені функціональні можливості протоколу IP викликали необхідність застосування додаткових засобів та механізмів для забезпечення QoS послуг зв'язку, що надаються мережею. Додаткові засоби та механізми реалізують дві моделі керування трафіком. Цими моделями є модель інтегрованих (Integrated Service – IntServ , RFC 1633) та модель диференційованих послуг (Differentiated Service – DiffServ , RFC 2475) [7, 38], які технічно реалізують протоколи RSVP, RTCP, RTP. Ці протоколи мають можливість управляти часовими затримками під час передачі IP - пакетів [7, 37, 38].

Модель IntServ орієнтована на надання гарантій QoS для трафіку кінцевих користувачів, тому технології, побудовані на основі даної моделі, застосовуються в основному в мережах користувачів та мережах доступу [7, 27, 34 – 37]. Технології, створені з урахуванням моделі DiffServ , орієнтовані на забезпечення заданих параметрів QoS для класів трафіку. Тому дані технології застосовують у магістральних мережах зв'язку [7, 27, 34 – 37].

Для збільшення можливостей масштабування функцій управління якістю, зниження рівня трафіку службової інформації, а також для можливості застосування компромісних рішень з управління QoS була розроблена модель DiffServ [34 - 40]. Завданням моделі DiffServ є забезпечення гнучкої (диференційованої) якості обслуговування різних послуг зв'язку [34 - 40].

Технології на основі моделі DiffServ забезпечують термінове та гарантоване просування даних. Параметри QoS оцінюються за значеннями швидкості передачі, значеннями мережної затримки, значеннями варіації затримки (джиттера) і значеннями коефіцієнта втрат пакетів [35, 41]. Наскрізну якість обслуговування реалізують протоколи транспортного рівня [33 – 38].

Оцінювані параметри трафіку є нелінійними і нестационарними випадковими послідовностями з апріорі невідомими ймовірнісними

характеристиками [37]. Тому якість їхньої оцінки має значний вплив на параметри QoS .

1.3 Аналіз взаємодії між оцінюванням трафіку та іншими управлінськими задачами в мережах зв'язку

Як було зазначено вище, основними моделями забезпечення QoS у МІС є моделі інтегрованих та диференційованих послуг. Протоколи, які реалізують ці моделі використовують дані поточного моніторингу параметрів мережного трафіку. Основні параметри трафіку, що циркулюють в мультисервісній інформаційній системі, і що впливають на якість послуг зв'язку, що надаються, визначені рекомендаціями ІТУ-Т [13, 49] і представлені в таблиці 1.4.

Таблиця 1.4 – Основні параметри трафіку у мультисервісній мережі зв'язку

Параметр	Значення параметра
Мінімальне значення трафіку	$\hat{Y}_{\text{mix}} = \min Y(i), i \in [\tau, \tau + T]$
Максимальне значення трафіку	$\hat{Y}_{\text{max}} = \max Y(i), i \in [\tau, \tau + T]$
Середнє значення трафіку	$\hat{Y}_{\text{mid}} = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^N Y(i);$ $i \in [\tau, \tau + T] - \text{дискретний час}$
Пікове значення трафіку	$\hat{Y}_p = Y(i) \geq Y_{\text{пор}}, i \in [\tau, \tau + T]$
СКВ трафіку	$\sigma_{\hat{Y}} = \frac{1}{N-1} \sqrt{(Y(i) - \hat{Y}_{\text{mid}})^2}$
Коефіцієнт пачечності трафіку (берестність)	$K = \frac{\hat{Y}_{\text{max}}}{\hat{Y}_{\text{mid}}}, i \in [\tau, \tau + T]$
Середня тривалість піку	$\bar{T}^{(P)} = \frac{1}{N^{(P)}} \sum_{i=1}^{N^{(P)}} T_i^{(P)}$
Коефіцієнт варіації	$K_{V\hat{Y}} = \frac{\sigma_{\hat{Y}}}{\hat{Y}_{\text{mid}}}$

Основним критерієм функціонування МІС з необхідними характеристиками є нормальна поведінка мережного трафіку, що відповідає встановленим правилам функціонування мережі. Взаємозв'язок завдання оцінки параметрів трафіку з іншими завданнями управління мережею, наведено на рисунку 1.12.

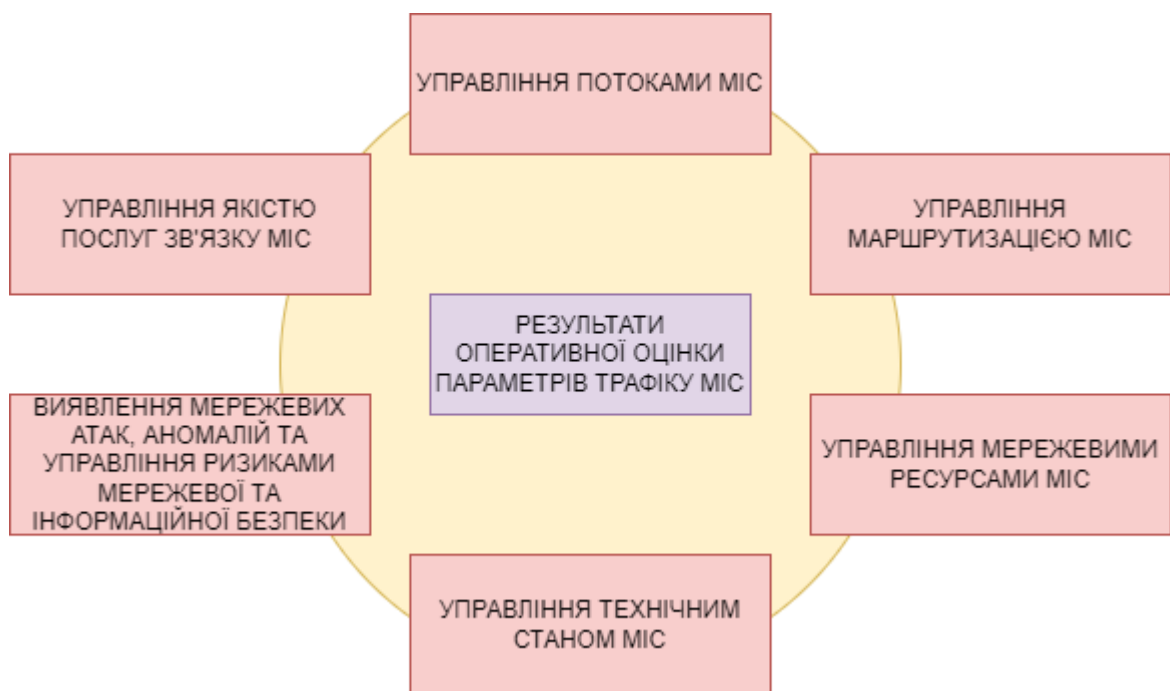


Рисунок 1.10 – Взаємозв'язок задачі оперативної оцінки параметрів трафіку МІС з іншими завданнями управління мережею

Трафік для різних додатків у МІС може бути апроксимований імовірнісними розподілами, представленими в таблиці 1.5.

Таблиця 1.5 - Імовірнісні розподілу мережного трафіку

Тип трафіку	Рівень моделі взаємодії відкритих систем	Закон розподілу
Голос, відео	Прикладний рівень	розподіл Парето

FTP/TCP	Транспортний рівень	розподіл Парето, розподіл Вейбулла, логнормальний розподіл
SMTP/TCP	Транспортний рівень	розподіл Пуассона, експоненційний розподіл
HTTP/TCP	Транспортний рівень	розподіл Парето, логнормальний трафік
Трафік IP	Мережевий рівень	розподіл Пуассона, розподіл Парето
Трафік Ethernet	Канальний рівень	розподіл Пуассона, розподіл Парето

Примітка: MBWC – модель взаємодії відкритих систем

В [37, 52, 54] показано, що мережевий трафік цілком відповідно представляється за допомогою моделей нелінійних і нестационарних стохастичних випадкових послідовностей. Ця обставина суттєво ускладнює оцінку його параметрів у режимі реального часу за допомогою наявних статистичних методів та алгоритмів [54]. У той же час значення оперативної оцінки параметрів трафіку є вихідними даними для виробки рішень з управління мережею [37, 52, 54].

1.4 Постановка завдання дослідження

Як було показано вище, МІС є великою і складною розподіленою системою. Особливостями МІС є складність інформаційно-логічної та фізичної архітектур, гетерогенність, для її управління необхідно аналізувати велику кількість різних багатовимірних мережевих характеристик та параметрів, що характеризуються високою динамікою апріорі невідомих змін, а також стохастичністю та нелінійністю фізичних та інформаційних процесів, що протікають у ній. Про те, як було показано вище, знання оцінок

характеристик трафіку МІС є основою прийняття відповідних поточному мережевому стану управлінських рішень [37, 49 - 54].

Перелічені особливості МІС викликають великі труднощі застосування існуючих концепцій і методів оперативного управління якістю послуг зв'язку МІС, заснованих на використанні моделей об'єкта управління, а також методів, заснованих на застосуванні різних статистичних методів [9, 53]. Ця обставина призвела до необхідності застосування вирішення завдань управління МІС інтелектуальних методів, наприклад, методів, заснованих на застосуванні та реалізації концепції розподілених ІА [2, 9, 53, 54]. Разом з тим, для технічної реалізації концепції розподілених ІА необхідно розробити стійкі до зміни в широких межах мережевих характеристик та простих у реалізації алгоритмів оцінки параметрів мережевого трафіку, що працюють у режимі реального або в режимі близькому до реального часу, з якістю достатньою для прийняття об'єктивних управлінських рішень .

Таким чином, об'єктом дослідження є завдання оперативної оцінки характеристик мережевого трафіку для управління якістю послуг зв'язку.

Предметом дослідження є моделі та алгоритми оперативної оцінки характеристик мережевого трафіку для забезпечення якості послуг зв'язку.

Метою дисертаційної роботи є підвищення оперативності оцінювання характеристик трафіку у високошвидкісних мультисервісних інформаційних системах, з достатньою точністю для прийняття об'єктивних рішень з управління якістю послуг і сервісів зв'язку.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі науково-технічні завдання:

1. Проаналізувати та дослідити мультисервісну інформаційну систему, як систему управління.
2. Дослідити моделі процесу оперативної оцінки характеристик трафіку в високошвидкісних мережах зв'язку.

3. Розробити алгоритми для оперативного оцінювання характеристик трафіку, які забезпечують точність, достатньою для прийняття об'єктивних рішень з управління якістю послуг зв'язку

4. Дослідити методи реалізації науково-технічних алгоритмів оперативного оцінювання характеристик трафіку на існуючих апаратно-програмних засобах.

5. Розробити метод реалізації алгоритмів оперативного оцінювання характеристик трафіку на існуючих і перспективних апаратно - програмних засобах.

1.5 Висновки до першого розділу

У першому розділі дисертації:

Досліджено та проаналізовано мультисервісну інформаційну систему як інструмент управління. Встановлено, що така система спрощує керування структурними підрозділами, розташованими в різних локаціях, та забезпечує функції контролю і моніторингу.

Показано, що розробка, функціонування та управління МІС повинно базуватися на принципах, в основі яких є концептуальні положення створення мереж класу NGN.

Проаналізовано основні технічні вимоги для МІС та його АЗУЗ. Обґрунтована актуальність вирішення задачі оперативного управління МІС для забезпечення необхідної якості послуг та сервісів зв'язку.

Проведено аналіз функціональної та технологічної архітектури МІС. Проаналізовано вимоги до управління мережею МІС.

Виконано аналіз моделі управління TMN, а також аналіз її фізичних та інформаційних архітектур. Проаналізовано розкладання ієрархічних рівнів контролю TMN та їх дотримання ієрархічного рівня контролю АСУЗ МІС. Зазначається, що основою моделі TMN є принцип розподіленої взаємодії "Агент - менеджер".

Проведено аналіз методів та технологій для забезпечення якості комунікаційних послуг МІС. Проаналізовано моделі інтегрованих та диференційованих послуг. Показано, що якість комунікаційних послуг визначається якістю функціонування та управління МІС.

На основі аналізу вимог, визначених світовими та національними стандартами індикаторів якості обслуговування (QoS), було встановлено, що завдання забезпечення якості комунікаційних послуг є багатокomпонентним завданням управління мережею.

На основі результатів аналізу взаємодії завдання оцінки характеристик та параметрів трафіку корпоративної мультисервісної інформаційної системи з іншими завданнями управління мережею, продемонстровано важливість та актуальність наукової та технічної проблеми оперативної оцінки характеристик мережевого трафіку. Показано, що МІС має складні інформаційно-логічні та фізичні архітектури, мережа є гетерогенною. Для управління МІС необхідно проводити аналіз великої кількості різних багатовимірних мережевих характеристик та параметрів, які характеризуються високою динамікою апріорі невідомих своїх змін. Фізичні та інформаційні мережеві процеси, у тому числі параметри мережевого трафіку, за своїми характеристиками є стохастичними та нелінійними випадковими процесами, що значно ускладнює оперативне оцінювання їх параметрів та характеристик.

Сформульована мета дисертаційної роботи, яка полягає у підвищенні ефективності оцінки параметрів трафіку у висошвидкісних мультисервісних інформаційних системах, з точністю, достатньою для прийняття об'єктивних рішень для управління послугами зв'язку.

2 КОНЦЕПТУАЛЬНА МОДЕЛЬ ПРОЦЕСУ ОПЕРАТИВНОГО ОЦІНЮВАННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ТРАФІКУ ДЛЯ АВТОМАТИЗОВАНОГО УПРАВЛІННЯ ЯКОСТЮ ПОСЛУГ У КОРПОРАТИВНИХ МУЛЬТИСЕРВІСНИХ МЕРЕЖАХ

2.1 Постановка задачі розробки концептуальної моделі оперативної оцінки характеристик трафіку у мультисервісних інформаційних системах

Концептуальна або змістовна модель (КМ) являє собою структуру процесу або системи, що моделюється, опис основних властивостей складових їх елементів, а також причинно-наслідкові зв'язки, властиві процесу або системи, які є суттєвими для досягнення мети моделювання. Структура КМ процесу або системи є логічно впорядкованою сукупністю складаючих процес або систему елементів, а також способів їх взаємозв'язків [54].

КМ розробляється у такому порядку [54, 55]:

1. Визначається мета концептуального моделювання, яка визначається фактом існування розв'язуваної задачі та її змісту (концептуальний аналіз), а також визначаються та обґрунтовуються способи вирішення цієї задачі (концептуальний синтез);
2. Розробляється змістовна модель, яка може бути частково або повністю представлена вербальною моделлю реального процесу або об'єкта, що є вихідними для подальшої розробки КМ;
3. Виконується аналіз розв'язуваної задачі, який при концептуальному аналізі є його основним результатом, а при концептуальному синтезі – основними вихідними даними;
4. Виконується аналіз середовища та умов функціонування МІС та їх вплив на процес оперативної оцінки параметрів трафіку МІС;
5. Виконується аналіз суттєвих системних властивостей, показників та вимог, а також визначається склад вхідних та вихідних даних;

6. Проводиться аналіз існуючих та можливих обмежень, що впливають на показники функціонування МІС

7. Проводиться аналіз логічної та функціональної структури досліджуваної процедури оперативної оцінки параметрів трафіку та її складових, а також аналіз її функціонування.

Однією з важливих характеристик КМ є її повнота. Повнота КМ відображає найбільш суттєві характеристики досліджуваного процесу [54, 55]. Структура КМ оперативної оцінки параметрів трафіку МІС представлена рисунку 2.1.

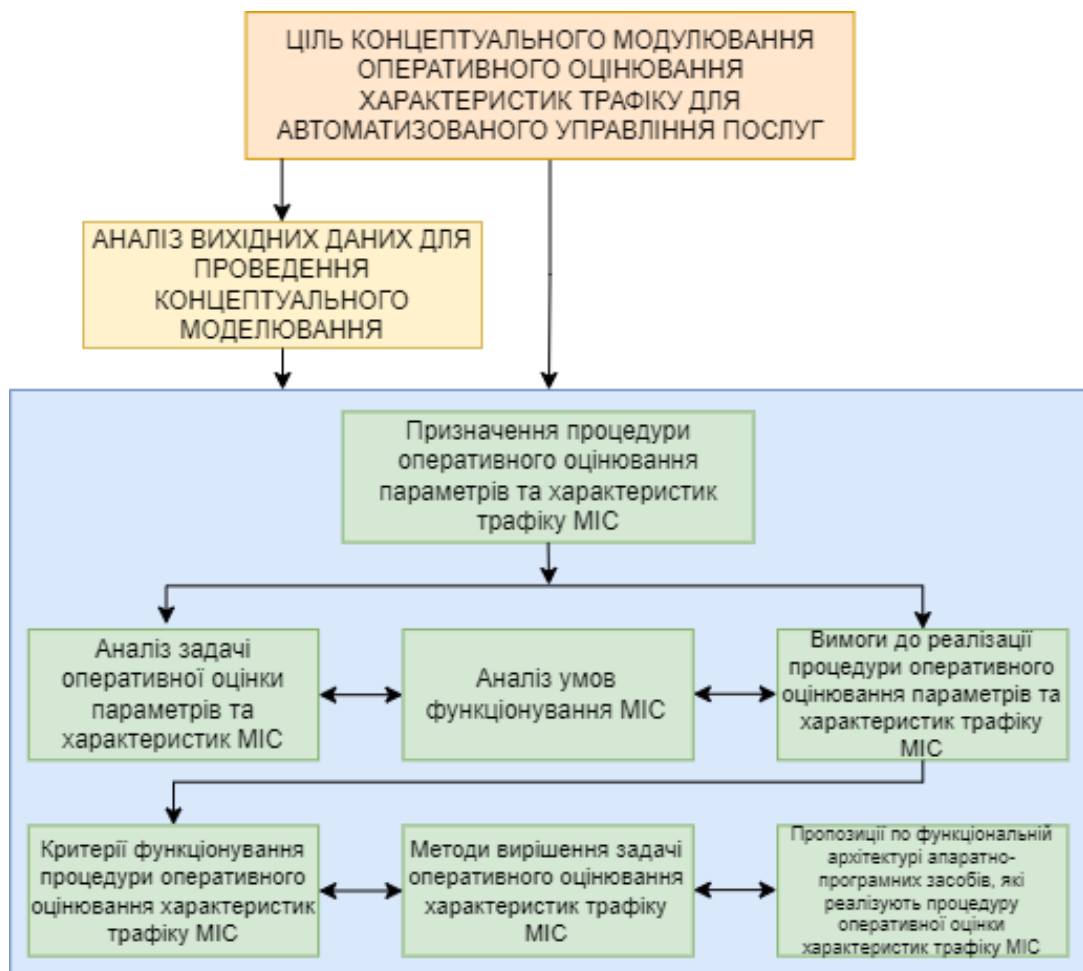


Рисунок 2.1 – Структура КМ оперативної оцінки характеристик трафіку МІС

Таким чином, постановка задачі синтезу КМ процедури оперативної оцінки характеристик трафіку в МІС може мати наступний вигляд.

Розглядається функціонування МІС, побудованої на основі стека TCP/IP/MPLS та концептуальних принципів мереж NGN та IMS. АСУЗ МІС функціонує з урахуванням моделі мережевого управління TMN.

Завданням є підвищення оперативності оцінювання характеристик трафіку у високошвидкісних мультисервісних інформаційних системах з точністю, достатньою для ухвалення об'єктивних рішень щодо управління якістю послуг зв'язку. При цьому мають бути вирішені протиріччя між вимогами безперервної оцінки параметрів мережевого трафіку, який передає МІС та існуючими статистичними методами та алгоритмами отримання цієї оцінки.

Потрібно розробити КМ та архітектуру апаратно-програмних засобів, що реалізують процедуру оперативної оцінки характеристик трафіку в МІС, а також реалізують їх методи та алгоритми.

Обмеженнями при вирішенні сформульованої вище задачі є вимоги несуперечності запропонованого рішення існуючим методам, алгоритмам та технологіям мережевого управління (моделі ієрархічного управління TMN), а також вимога несуперечності протокольному стеку TCP/IP/MPLS. Запропоновані рішення мають доповнювати існуючі методи та алгоритми мережного управління.

Умови функціонування апаратно-програмних засобів, що реалізують результати концептуального синтезу, можна сформулювати в наступному вигляді:

- ймовірнісні властивості трафіку МІС адекватно описуються моделями нелінійних, нестационарних випадкових процесів та послідовностей, зазначених у розділі 1, п. 1.3 цієї роботи;

- МІС має великий просторовий розмах, через що можуть виникати значні часові затримки при збиранні результатів мережевого моніторингу і, як наслідок, у часі вироблення управлінських рішень, так і в часі реалізації прийнятих управлінських рішень;

- багато мережевих процесів не мають властивість статистичної стійкості, що також ускладнює їх аналіз;
- великий просторовий розмір мережі призводить до виникнення певної невизначеності та неточності результатів мережного моніторингу;
- оцінку параметрів трафіку МІС та розроблення відповідних управлінських рішень необхідно проводити в режимі часу близькому до реального.

2.2 Аналіз невизначеності керуючої інформації у мультисервісних інформаційних системах і методів її вирішення

Так як МІС є зазвичай великою просторово розподіленою і складною системою, то в ній процес оперативної оцінки параметрів трафіку досить обмежений [54 - 56]. Трафік у МІС описується нелінійними та нестационарними статистичними моделями. У даних оперативного моніторингу параметрів мережного трафіку завжди є похибки, неточності та невизначеності. Отже, необхідно проаналізувати та виявити основні причини їх виникнення. Можливий варіант класифікації невизначеностей представлений рисунком 2.2 [54-56].

При виробленні рішень з управління якістю послуг зв'язку слід враховувати невизначеності, які обумовлені наведеними нижче причинами [55, 56]:

1. Неточність даних моніторингу, що виникає через похибки мережевих датчиків і сенсорів, можливих їх технічних відмов, часового запізнення під час передачі даних моніторингу тощо;
2. Неточність може бути наслідком помилок при побудові моделі управління QoS, в якій можуть бути присутніми неточність та неповнота обліку характеристик об'єкта управління [55, 56];
3. Неоднозначність і нечіткість процесу прийняття рішень в ієрархічній АСУЗ МІС, які обумовлені тривалістю процесу координації та узгодження

рішень між завданнями як одного рівня управління, так і за їх міжрівневої координації [58];

4. Так як АСУЗ МІС є інформаційно-керівною системою організаційного типу, то в контурі її управління присутній оператор – людина, особа, яка приймає рішення (ОПР), наприклад, мережевий адміністратор. Це може призвести до прийняття суб'єктивних управлінських рішень та збільшення часу циклу управління [61].

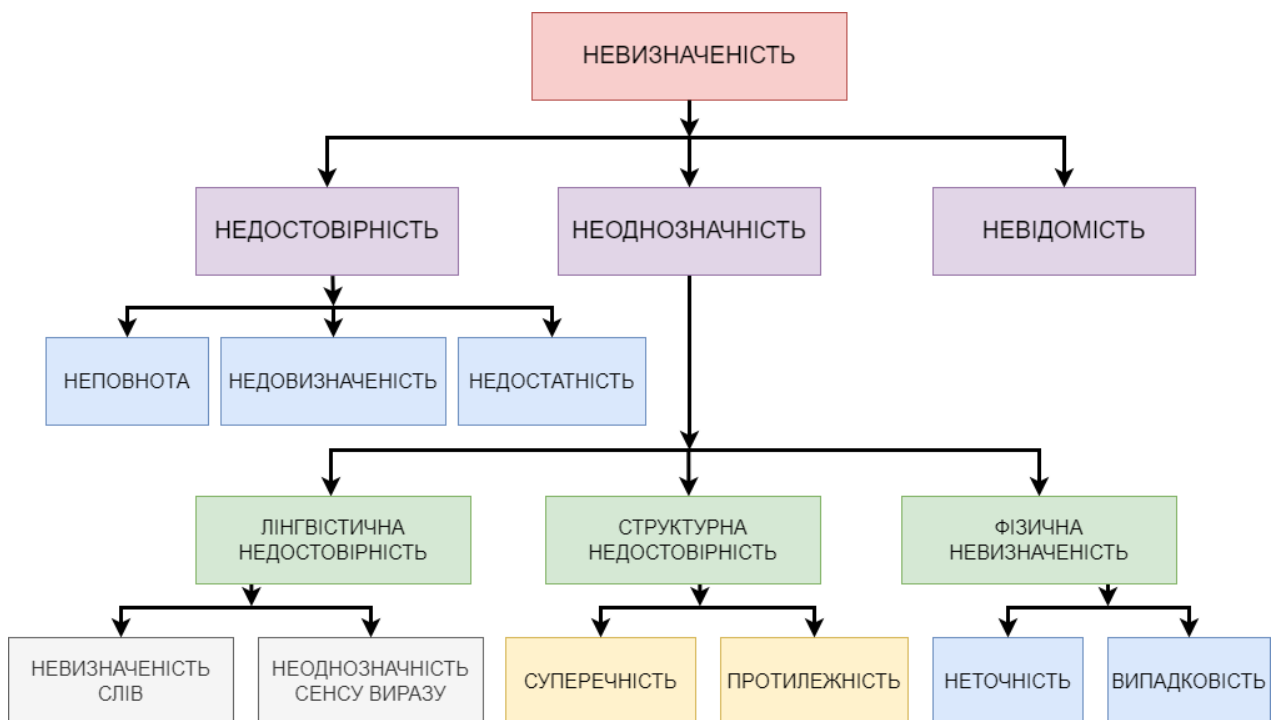


Рисунок 2.2 – Класифікація невизначеностей мережевих параметрів

Вирізняють два типи управління. До першого типу відносять детерміноване управління, яке визначено на весь час роботи керованої системи чи об'єкта. До другого типу можна віднести адаптивне управління, при якому на основі сигналів зворотного зв'язку про стан керованого об'єкта розроблюються відповідні керуючі рішення [60]. Для складних розподілених систем потрібно знайти компроміс у виборі як моделей керованого об'єкта, так і процесу управління і точністю прийнятого рішення. Компроміс може полягати в тому, що точність рішення може бути не максимально можливою

(досяжною), а достатньою для прийняття раціональних управлінських рішень [61, 62]. Одним із способів виключення прийняття помилкового управлінського рішення є використання інтелектуальних методів обробки даних [63, 64].

АСУЗ МІС створюється з урахуванням ієрархічного принципу. В АСУЗ МІС присутні адміністративна, функціональна ієрархія, а також ієрархія завдань управління [61 - 63].

Ієрархічний принцип управління забезпечує можливість координації та узгодження локальних та глобальних критеріїв функціонування кожного ієрархічного рівня управління. Реалізація цього принципу забезпечує скорочення обсягів службових інформаційних потоків та їхню логічну структурування, забезпечує підвищення надійності роботи всієї системи управління, а також підвищення адаптивності до зовнішніх умов функціонування [61 - 63]. При ієрархічному управлінні мета вищої підсистеми полягає в управлінні нижчими підсистемами так, щоб досягалася глобальна мета функціонування всієї системи [54 - 56, 60, 61].

2.3 Вивчення показників якості послуг зв'язку у мультисервісних інформаційних системах

Якістю послуг зв'язку називається властивість послуги, яка задовольняє потребу абонентів мережі [33 – 37]. Цільовим призначенням МІС є надання послуг зв'язку та підтримання їхньої якості на необхідному рівні. Якість може визначатися числовою характеристикою, векторним показником, а також функціональною залежністю [33 – 37].

Узагальнена оцінка характеристик мережі, які визначають ефективність її функціонування, формується як ієрархічна система показників якості (ІСПЯ) на основі показників якості її окремих властивостей [33 – 37].

Характеристики якості послуг зв'язку визначаються двома складовими. До першої складової відносяться показники, пов'язані з QoS, а до другої

складової відносяться показники, що визначаються якістю функціонування МІС(Network Performance, NP) [34 - 37]. Приклад ІСПЯ МІС наведено на рисунку 2.3.



Рисунок 2.3 – Структура ієрархічної системи показників якості МІС

Якість обслуговування визначається якістю функціонування МІС. Якість функціонування мережі визначає її здатність забезпечувати зв'язок між абонентами та визначається можливістю мережі обробляти трафік наявними ресурсами [34 - 37].

Натомість, якість мережевого управління впливає як на показники QoS, так і на показники мережевого функціонування [34 - 37]. Вона характеризується часовими показниками циклу управління, безперервністю управління, її стійкістю та безпекою [34 - 37].

Водночас, на якість процесу управління впливають показники процесу прийняття оперативних об'єктивних та адекватних рішень щодо управління МІС. Управлінські рішення приймаються з урахуванням даних моніторингу (рисунок 2.3). Отже, якість процесу мережного моніторингу, зокрема і моніторингу мережевого трафіку, впливає на якість оперативного мережного управління та якість наданих послуг та сервісів зв'язку користувачам [34 - 37].

Для мереж класу NGN, у тому числі і для МІС, наскрізна якість послуг регулюється за допомогою механізмів, що визначаються на основі угоди про рівень обслуговування (Service Level Agreement, SLA) між оператором та користувачем послуг [34 - 37]. Ця угода включає як організаційно-економічні параметри, так і параметри, що характеризують функціонування мережі, наприклад, параметри продуктивності, швидкості передачі даних абонента, параметри надійності мережі, інформаційної та мережевої безпеки і т.д. Ці параметри вимірюються та оцінюються шляхом активного та пасивного тестування робочих характеристик підсистемами підтримки експлуатації мережі АСУЗ МІС [34 – 37].

Основні стандарти, що визначають мережеві параметри, пов'язані з QoS в МІС наведені, наприклад, в [36]. Модель вимог до QoS з боку користувача наведена у таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Модель вимог до QoS з боку користувача

Помилки інформації	Допустимі	Розмова (голос, відео)	Передавання повідомлень (голос, відео)	Потоки (аудіо, відео)	Факсимільні значення
	Недопустимі	Команди, управління (інтерактивний, обмін)	Транзакції	Передача повідомлень, завантаження файлу	Фонові інформація (довідкова інформація)
		<< 1 с	≈ 2 с	≈ 10 с	>>10 с
Затримки інформації					

Гранично допустимі значення QoS під час передачі мультимедійного трафіку наведені у таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 - Гранично допустимі параметри QoS під час передачі мультимедійного трафіку

Тип сервісу	Параметри якості обслуговування				
	Час установлення з'єднання, с	Ймовірність розриву з'єднання	Затримка, мс	Джитер, мс	Ймовірність втрати даних
IP-телефонія	0,5-1	10^{-3}	25-500	100-150	10^{-3}
Відеоконференція	0,5-1	10^{-3}	30	30-100	10^{-3}
Цифрове відео по запиту	0,5-1	10^{-3}	30	30-100	10^{-3}
Передача даних	0,5-1	10^{-6}	50-1000	-	10^{-6}
Телевізійне мовлення	0,5-1	10^{-8}	1000	-	10^{-8}

Забезпечення виконання вимог щодо забезпечення показників QoS під час експлуатації МІС реалізується функціональними підсистемами АСУЗ МІС [2].

2.4 Розробка компонентів системної архітектури для оцінювання параметрів трафіку в мультисервісних інформаційних системах

Як було зазначено вище, основними послугами зв'язку, що надаються МІС користувачам, є послуги м'якого реального часу (файловий обмін , електронна пошта), різні послуги жорсткого реального часу, наприклад, IP-телефонія , передача мультимедійного трафіку, передача керуючої інформації [11]. До основних послуг зв'язку слід також віднести передачу керуючої інформації, яка призначена для забезпечення стійкого та безперервного управління розподіленими системами радіозасобів, системами радіотехнічних засобів, різними системами моніторингу даних та системами забезпечення

безпеки інформації. До основної послуги зв'язку також слід віднести захист циркулюючої в мережі інформації [11].

До основних мережевих характеристикам та параметрів, що впливають на якість послуг зв'язку, відносяться поточний технічний стан мережі та її МЕ, ймовірності втрат переданих IP-пакетів, значення пропускну здібностей мережі або окремих каналів зв'язку (біт/с), часи затримок передач пакетів, варіацій часових затримок передач пакетів [11, 36].

QoS в МІС, так само, як і в мережах класу NGN, реалізується за допомогою наступних основних механізмів [36, 39, 44]:

1. У площині управління – це механізми керування доступом, механізми QoS – маршрутизації, механізми резервування ресурсів (наприклад, застосуванням протоколу RSVP).

2. У площині даних використовуються механізми управління буферами маршрутизаторів, прогнозування, запобігання та керування навантаженнями трафіку, маркування пакетів, управління чергами, механізми класифікації трафіку, а також механізми управління характеристиками трафіку.

3. У площині менеджменту застосовуються механізми мережевих вимірювань, а також забезпечення та контролю виконання угод про рівень QoS - SLA (Service Level Agreement)

Управління QoS в МІС виконується АСУЗ. АСУЗ МІС, як було зазначено вище, створюється та функціонує на основі концепції ієрархічного мережевого управління, що визначається моделлю TMN [36, 44].

Процес прийняття раціональних рішень з управління QoS МІС представляє собою вибір раціональної альтернативи з безлічі можливих альтернатив. Цей процес є завданням багатокритеріальної оптимізації [46, 47]. Вирішені завдання мають різний рівень ієрархії мережевого управління у моделі TMN. Завдання нижніх рівнів ієрархії можуть мати суперечливі критерії оптимізації. Отже, за їх рішення необхідно реалізовувати процедури координації та узгодження, як критеріїв розв'язуваних задач, так і отриманих рішень [47 – 48].

Проведений у роботі аналіз основних завдань, рішення яких використовуються для забезпечення заданих рівнів QoS в МІС, дозволив скласти структуру їх ієрархічної взаємодії, представлену на рисунку 2.4 .

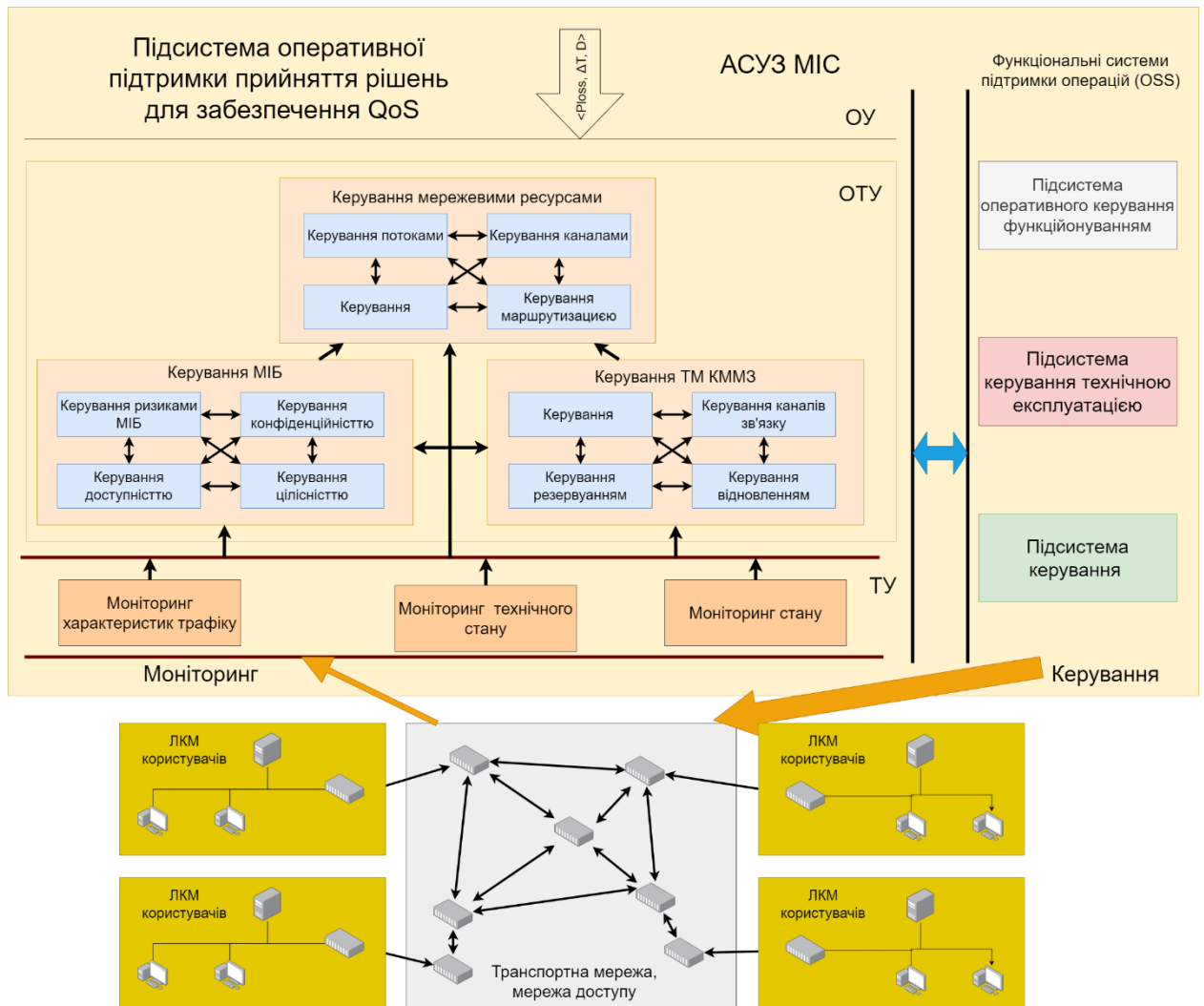


Рисунок 2.4 – Структура ієрархічного взаємодії завдань з управління QoS МІС

Розв'язання задач з оперативної підтримки прийняття рішень для управління якістю послуг здійснюється у підсистемі оперативною підтримки прийняття рішень (ПОППР), яка є функціональною підсистемою АСУЗ МІС. Реалізація отриманих рішень виконується за допомогою підсистем підтримки операцій (OSS). Основними завданнями, результатами рішень яких впливають

на процес управління QoS є завдання управління мережевими ресурсами, завдання управління поточним технічним станом мережі та її МЕ, є завдання управління мережевою та інформаційною безпекою (МІБ) .

Слід відзначити , що в моделях IS і DS основною процедурою, яку необхідно виконати для вироблення відповідного управлінського рішення, є процедура оперативної оцінки як мережових параметрів, так і параметрів , які визначають поточний технічне стан МЕ, необхідних для прийняття раціональних управлінських рішень .

Оперативність управління визначається як [48]:

$$P_{oy} = (P(t_y \leq T_0), \text{ при } \bar{R}(\bar{b}) \geq \bar{R}_{нб}(\bar{b})), \quad (2.1)$$

де P_{oy} – ймовірність не перевищення часу циклу управління заданого часу T_0 , $\bar{R}_{нб}(\bar{b})$ - векторний критерій складових значень необхідного якості управління.

Час циклу управління t_y у включає:

- час збору даних моніторингу про стан МЕ $t_{зб}$;
- час аналізу інформації $t_{ан}$;
- час вироблення рішень $t_{рш}$;
- час доведення $t_{дв}$, управляючої інформації до мережових елементів;
- час реалізації мережевими елементами управлінських рішень $t_{рз}$;
- час підтвердження виконання управлінських рішень $t_{пт}$ [48].

Отже , справедливе співвідношення:

$$t_y = t_{зб} + t_{ан} + t_{рш} + t_{дв} + t_{пт} \quad (2.2)$$

Зменшення часу циклу управління полягає у зниженні значення виразу (2. 2).

Аналіз процесу управління QoS показав , що найбільш перспективним напрямом у розробці ПОППР АСУЗ МІС є напрямок, в основі якого використовується концепція розподілених інтелектуальних агентів (ІА), які реалізують принцип «ситуація – дія» [48]. Його перевагами є орієнтованість на аналіз та моделювання процесів, які представлені у вигляді логіко-часових послідовностей, а також у вигляді узгодженої сукупності процесів, які у них протікають. В даному випадку принципом побудови АСУЗ МІС на основі ситуаційного підходу є аналіз та регулювання моделі процесу управління якістю послуг у МІС [11, 48].

Завдання даного дослідження полягає у розробці методу оперативної підтримки прийняття рішень на основі розподіленої ієрархічної нечіткої ситуаційної мережі, що реалізує концепцію ІА, для управління якістю послуг зв'язку .

Відмітимо , що перевагами концепції ІА є [11, 48]:

1. Підвищення адаптивних властивостей ПОППР. ІА адаптуються до мережевої інфраструктури, оперативно та адекватно реагують на зміни в конфігурації та технічному стані мережевого обладнання.
2. Раціональний розподіл та оперативний перерозподіл обчислювальних та мережевих ресурсів, оскільки ІА можуть входити до складу всіх основних мережевих елементів МІС (її підмереж , сегментів , доменів).
3. Підвищення надійності функціонування ПОППР.
4. Застосування ІА знижує рівень ризику мережевої та інформаційної безпеки МІС [11]

Реалізацію запропонованого підходу пропонується виконувати на основі базової системної архітектури інтелектуального агента (БСА ІА), що наведено рисунку 2.5 [11].

До складу БСА ІА входять модуль оцінки ієрархічною нечіткою ситуацією МЕ, який складається з ієрархічної структури машин нечіткого логічного висновку Мамдані для кожної функціональною групи МЕ, модуль

формування рішень, що складається з блоку формування рішень та блоку рішення інформаційно-розрахункових завдань.

В разі якщо адміністратор мережі (особа, яка приймає рішення - ОПР) надає ІА можливість виконання прийнятого рішення через автоматизовану систему управління МЕ, то управління буде виконуватись в автоматичному режимі. В цьому випадку ІА тільки повідомляє ОПР про реалізовані рішення [12].

Під функціональною групою МЕ мається на увазі набір його параметрів, які характеризують один з його функціональних станів. Наприклад, функціональна група електроживлення МЕ, функціональна група обчислювальної продуктивності МЕ і т.д.

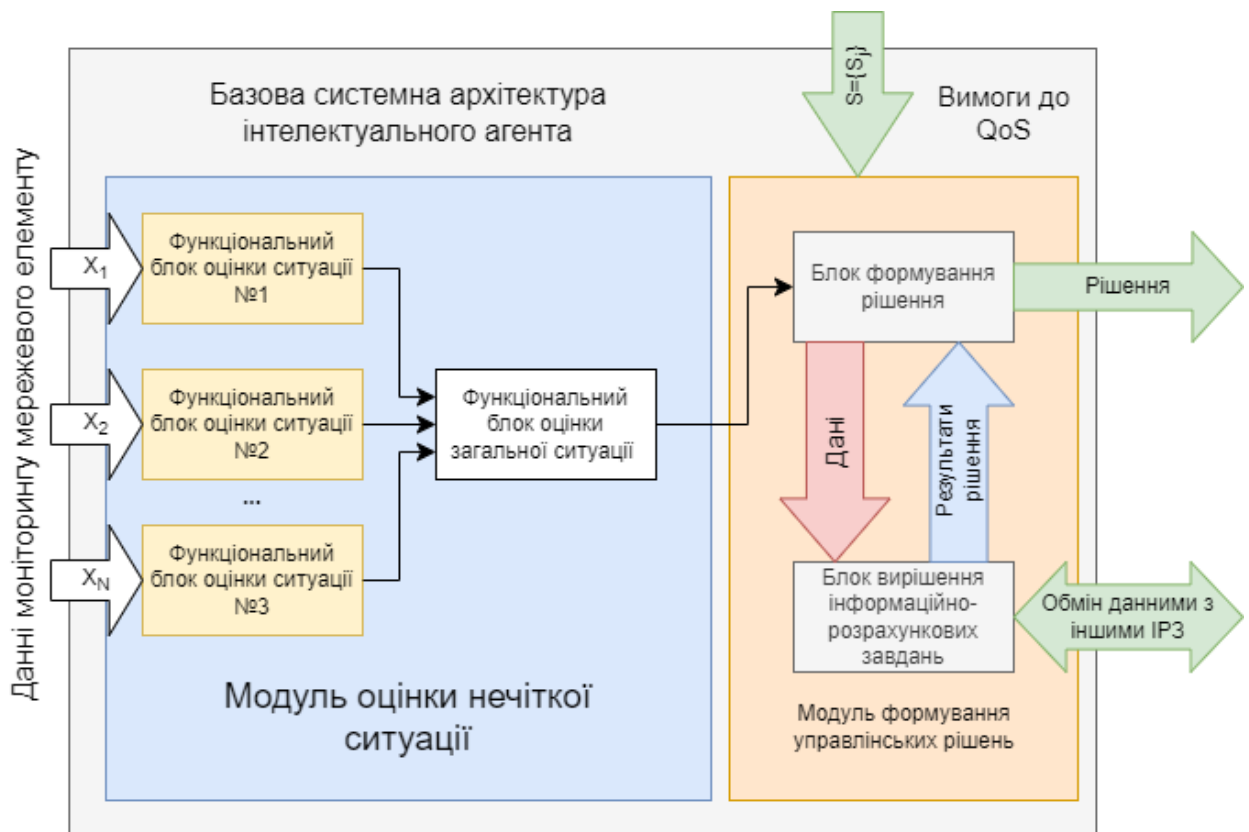


Рисунок 2.5 – Базова системна архітектура ІА для управління QoS .

Пропонована базова функціональна архітектура ІА (БФА ІА) для управління якістю послуг зв'язку наведена на рисунку 2.6. Тут же представлено схему взаємодії ІА з МЕ [12].

До складу БФА ІА входять модуль оцінки ситуації стану МЕ, модуль розв'язання інформаційно-розрахункових завдань та модуль прийняття рішень [7, 52].

Стисло розглянемо алгоритм функціонування ІА. Нехай $X = \{x_{f1}, x_{f2}, \dots, x_{fm}\}$ – безліч ознак, відповідних даному станоме функціонально групи МЕ, наприклад , параметри трафіку на інтерфейсах маршрутизатора [6, 11].

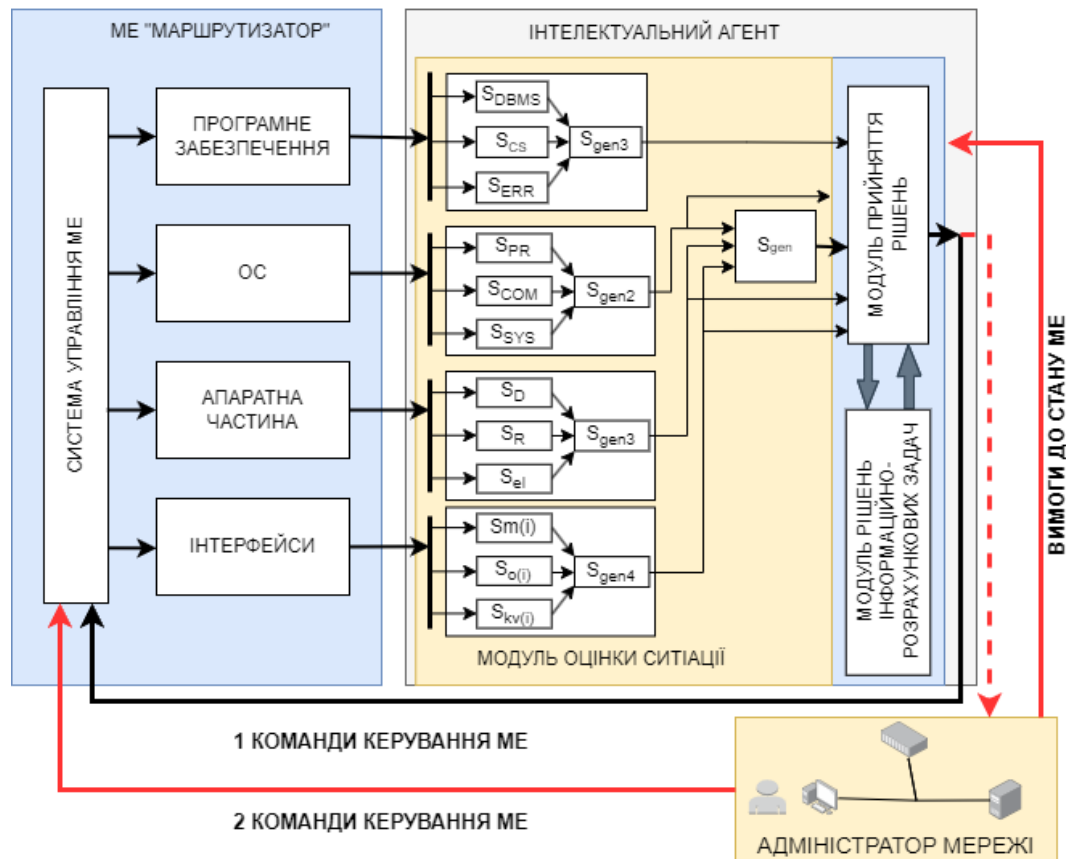


Рисунок 2.6 – БФА ІА для керування QoS

Нехай ці ознаки $x_{fg}, i = \overline{1, m}$ що характеризують стан обраної функціональної групи МЕ, описуються лінгвістичними змінними :

$$\langle x_{fg}, T_i, U_i \rangle \quad (2.3)$$

де $T_i = \{T_1^i, T_2^i, \dots, T_m^i\}$ - терм- множина лінгвістичної змінної, m – число нечітких значень ознаки x_{fi} , а U_i – базова множина ознаки x_{fi} [45 - 47, 64]. Терми $T_j^i (i = \overline{1, m}, j = \overline{1, k})$ визначаються нечіткими множинами A_{ij} , які задаються за допомогою функцій належності $\mu_{A_{ij}}(p_{f_{gi}})$ в базових множинах U_i :

$$A_{ij} = \left\{ \left(\frac{\mu_{A_{ij}}(x_{fi})}{x_{fi}} \right) \right\}, \quad x_{f_{gi}} \in U_i \quad (2.4)$$

Оцінка нечіткої ситуації стану МЕ інтелектуальним агентом виходить на виході ієрархічної системи машин нечіткого логічного висновку Мамдані у вигляді нечіткої множини другого рівня [6, 11, 64]:

$$S_{gf} = \{(S_{gf}(x_{fi})/x_{fi}), \quad i = \overline{1, m} \quad (2.5)$$

де

$$S_f(x_{fi}) = \{(\mu_{A_{ij}}(x_{fi})/T_j^i)\}, \quad j = \overline{1, k} \quad (2.6)$$

Наприклад, нечітка ситуація стану МЕ, при заданих значеннях функціональних ознак «**Технічний стан МЕ (ТС МЕ)**», «**Стан трафіку (TR)**» може бути представленою у вигляді нечіткої ситуації, що має вигляд:

$$S_{заг} = \left\{ S_{gf1} = \frac{0,9}{\text{ТС МЕ:}\langle\langle\text{нормальне}\rangle\rangle}, S_{gf2} = \frac{0,75}{\text{TR:}\langle\langle\text{допустиме}\rangle\rangle} \right\} \quad (2.7)$$

Значення загальної нечіткою ситуації стану МЕ буде мати вигляд – $S_{заг} = \langle\langle\text{“допустиме”}\rangle\rangle$. При цьому, в свою чергу, значення приватних нечітких ситуацій стану МЕ можуть мати вигляд [6]:

$$S_{загf1} = \left\{ \frac{0,9}{\text{ПЗ МЕ:}\langle\langle\text{нормальне}\rangle\rangle}, \frac{0,83}{\text{АПЗ МЕ:}\langle\langle\text{нормальне}\rangle\rangle}, \frac{0,75}{\text{інтерфейси МЕ:}\langle\langle\text{нормальне}\rangle\rangle} \right\} \quad (2.8)$$

де ПЗ МЕ – програмне забезпечення МЕ; АПЗ МЕ – апаратні засоби МЕ.
 Нечітка ситуація «Стан трафіку (TR)» може мати вигляд [6]:

$$S_{\text{заг}f1} = \left\{ \frac{0,9}{\hat{m}(i):\langle\langle\text{нормальне}\rangle\rangle}, \frac{0,83}{\hat{\sigma}(i):\langle\langle\text{нормальне}\rangle\rangle}, \frac{0,75}{\hat{k}_v(i):\langle\langle\text{нормальне}\rangle\rangle} \right\} \quad (2.9)$$

де $\hat{m}(i)$, $\hat{\sigma}(i)$, $\hat{k}_v(i)$ – поточні значення оцінок математичного очікування інтенсивності трафіку на вибраному інтерфейсі МЕ, середньоквадратичного відхилення та коефіцієнта варіації відповідно. Стан кожної функціональної групи характеризується термами $\langle\langle\text{нормальне}\rangle\rangle$, $\langle\langle\text{допустиме}\rangle\rangle$, $\langle\langle\text{не допустиме}\rangle\rangle$.

У наведеній структурі БФА інтелектуального агента число ієрархічних рівнів визначається на етапі його проектування, з урахуванням конкретних особливостей розв'язання їм певних задач.

Вимоги, якими повинні задовольнятися проектовані бази правил ІНСМ ІА представлені в [64, 65, 70]. До основних з них відносяться вимоги локальності правил нечіткого логічного висновку, обліку залежності числа правил від числа, що містяться в нечіткій моделі нечітких множин, повноти та несуперечності баз правил нечіткого логічного висновку, зв'язності та надмірності бази правил нечіткого логічного висновку [64, 70].

Для забезпечення виконання цих вимог зазвичай застосовують метод із попереднім навчанням [70].

Математичну модель процесу управління якістю послуг зв'язку МІС загальному випадку можна уявити як [2, 3, 51, 70]:

$$Y_{ij} = \bigcup_{i \neq 1}^N F_{ij}(\theta_{ij}(X_{ij}, U_{ij})) \quad (2.10)$$

де $X_{ij} = \{x_{ij}/\mu(x_{ij})\}$ – безліч нечітких ознак стану j -го рівня управління МІС $U_{ij} = \{u_{ij}/\mu(u_{ij})\}$ – нечіткі керуючі впливу j -го рівня управління, θ_{ij} – оператор агрегування, F_{ij} – оператор оптимізації i -го рівня управління, $Y_{ij} = \{y_{ij}\}$ безліч критеріїв .

На кожному ієрархічному рівні модель процесу управління МІС може бути представлена або як векторний критерій оптимізації, або як сукупність згорток приватних критеріїв оптимізації [47, 70].

Реалізований БФА ІА оператор управління представляє собою сукупність процедур рішень впорядкованого набору задач нечіткого математичного програмування [47, 70]. У загальному вигляді постановка цієї задачі може бути представлена як [47, 70]:

$$\bar{Y}_r(X^*) = \text{extr} \bar{Y}_r(x), r = \overline{1, R}$$

при обмеженнях:

(2.11)

$$W = \{X/H_{kj} \leq x_j \dots, j = \overline{1, n}, k = \overline{1, m}\}$$

Загальна структура алгоритму, що реалізує запропоновані принципи підтримки прийняття рішень для управління QoS в МІС наведено рисунку 2.7.

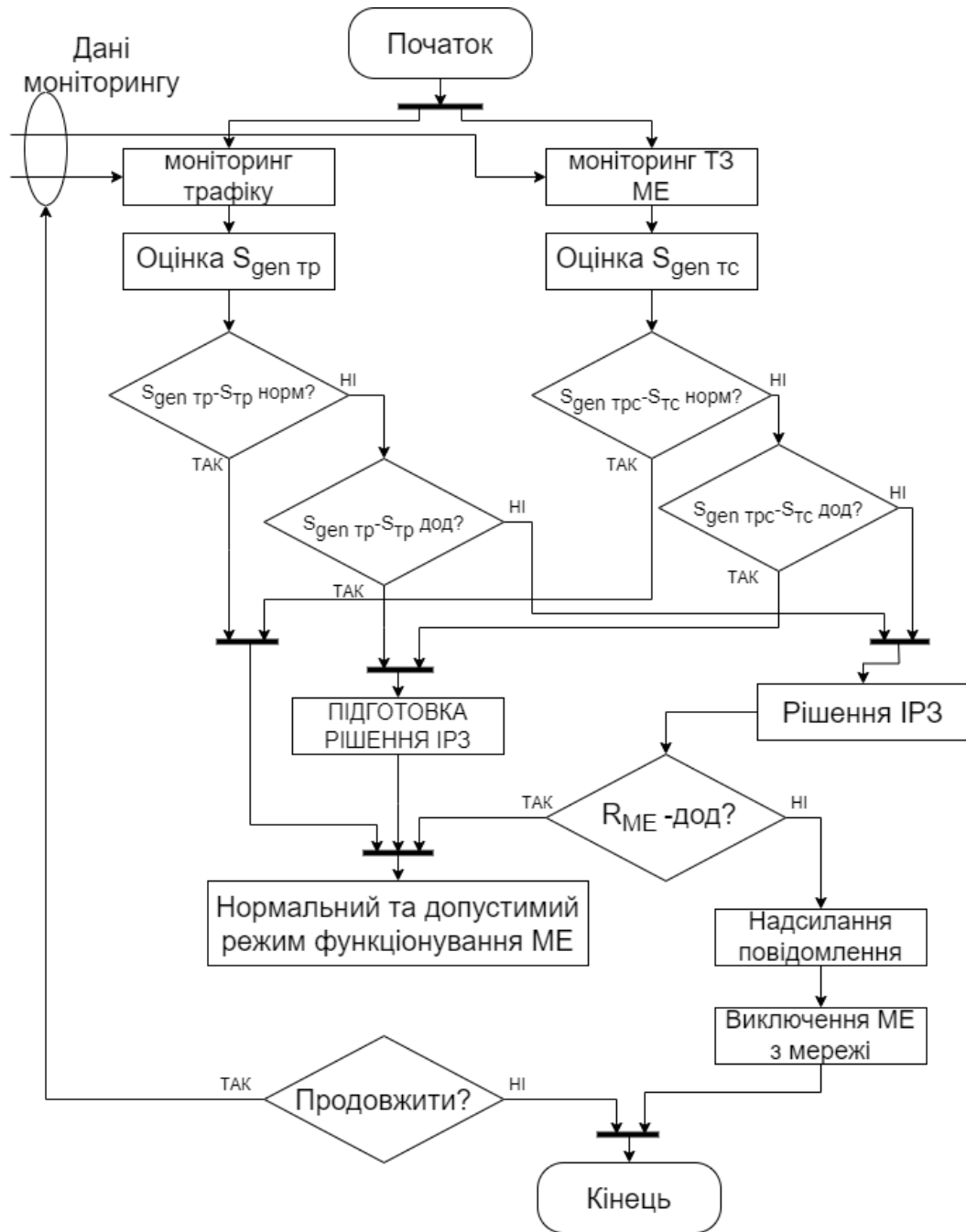


Рисунок 2.7 – Структура алгоритму підтримки прийняття рішень для управління QoS в МІС

Системна архітектура ПОППР АСУЗ МІС, основою якої є концепція ІА, наведена на рисунку 2.8.

ПОППР АСУЗ МІС створюється як накладена на МІС мережа. Існує кілька варіантів створення апаратно–програмних засобів ІА. Наприклад, ІА можуть створюватися як вбудовані в МЕ пристрої, як пристрої, які фізично

розташовуються поруч з МЕ та обмінюються з МЕ інформацією за допомогою телекомунікаційних , або як розподілених систем.

Примітка : $S_{gen\ tr}$ – нечітка ситуація стану трафіку МЕ; $S_{gen\ tr}$ – нечітка ситуація технічного стану МЕ; R_{ME} - ресурс МЕ.

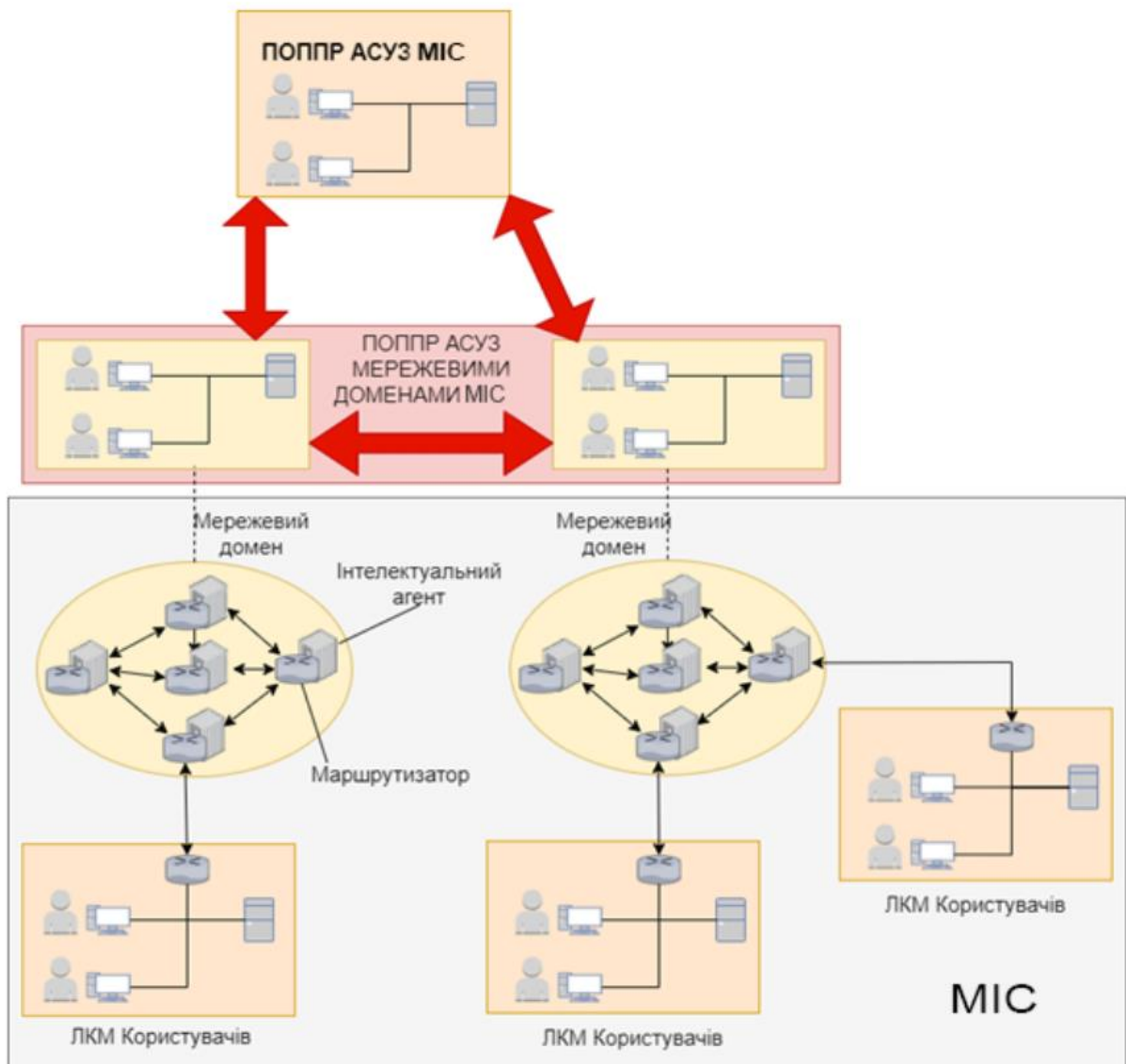


Рисунок 2.8 – Системна архітектура АСУЗ МІС

Взаємодія всередині мережевих доменів між ІА здійснюється з найвищим пріоритетом [2, 6].

ПОПР МІС функціонує наступним чином. Поточне цільове завдання для ПОПР МІС щодо забезпечення якості послуг зв'язку формується АСУЗ

МІС. Далі, сформовані вимоги підсистемою верхнього рівня ієрархії передаються на ПОППР МІС. ПОППР МІС виробляє декомпозицію цього завдання на відповідні підзавдання та передає їх на ПОППР АСУЗ мережевих доменів МІС, де виготовляється їх координація та узгодження між ПОППР АСУЗ мережевих доменів. Після цього, деталізовані завдання у вигляді вимог щодо забезпечення якості послуг з ПОППР АСУЗ мережевих доменів передаються як вимоги до ІА. В процесі функціонування мережевих доменів ІА здійснюють безперервний моніторинг та оцінку значень мережевих параметрів, зокрема параметрів циркулюючого в мережі трафіку в режимі часу близького до реального. Якщо відбувається відхилення значень контрольованих параметрів від встановлених, ІА приймає рішення щодо їх усунення та приведення їх до необхідних значень. Якщо відповідних ресурсів мало, то приймається і реалізовується рішення щодо перерозподілу відповідних мережевих ресурсів [2, 6].

2.5 Аналіз ефективності концептуальної моделі оперативного оцінювання параметрів трафіку для управління якістю послуг в мультисервісних інформаційних системах

Для оцінки ефективності концептуальної моделі оперативного оцінювання параметрів трафіку для управління якістю послуг у МІС необхідно, в якості вихідних даних, розглянути умови функціонування мережі та вимоги до якості послуг зв'язку МІС [72].

Пропонуються наступні критерії ефективності концептуальної моделі оперативного оцінювання параметрів трафіку для управління якістю послуг зв'язку :

- Час виробітку управлінських рішень;
- Точність оцінки мережевої ситуації. Критерій вважається виконаним, якщо точність отриманих параметрів буде достатньою для прийняття раціональних рішень з управління якістю послуг зв'язку

Проведений аналіз вимог до ПОППР АСУЗ МІС показав, що достатньо важко визначити абсолютні числові значення необхідної оперативності оцінки параметрів мережевого трафіку та показниками оперативності вироблення управлінських рішень. Ці параметри та характеристики, як вказується в роботах [2, 6], залежать від багатьох умов, наприклад, від конкретної технічної та функціональної реалізації мережі зв'язку, від безлічі поточних зовнішніх умов експлуатації МІС, від виду та типу конкретної послуги зв'язку, що надається МІС і так далі [6].

Аналіз показників ефективності запропонованих у роботі методів та алгоритмів проводився в порівнянні з відомими методами оперативного управління, до яких належать, наприклад, методи на основі нечітких ситуаційних мереж з використанням еталонних ситуацій [46, 48, 78], а також зі статистичними методами [73 – 77].

Технічна реалізація методів виводу рішень на основі нечітких ситуаційних мереж з використанням еталонних ситуацій при побудові ПОППР АСУЗ МІС важко реалізується або практично неможлива, тому що:

- навіть незначне збільшення кількості оцінюваних мережевих параметрів викликає значне зростання кількості еталонних ситуацій, оскільки ця залежність носить експоненційний характер [59, 70];

- навіть при незначній зміні цільових вимог до функціонування МІС, потрібна зміна всієї безлічі еталонних ситуацій, що практично неможливо зробити в процесі експлуатації МІС. Крім цього, всі можливі мережеві стани передбачити заздалегідь практично неможливо.

Запропонований підхід, заснований на застосуванні методів рішення ієрархічного набору оптимізаційних завдань на основі методів нечіткого математичного програмування, дозволяє оперативно отримувати Парето-раціональні управлінські рішення [78, 79, 81].

Порівняння ефективності концептуальної моделі ПОППР МІС проведемо в порівнянні зі статистичними методами [87 - 89]. Зробимо кілька попередніх зауважень.

Апаратно–програмний засіб менеджер, згідно моделі TMN, взаємодіє з групою агентів. Подібну взаємодію можна уявити за допомогою моделі системи масового обслуговування виду $M/M/1/k$. У найпростішому випадку, в цієї моделі всі потоки можна апроксимувати пуасонівськими потоками. Один менеджер обслуговує k незалежних черг заявок, кожна з яких формується від одного агента. Це можна уявити у вигляді марківської моделі $M/M/1$ з інтенсивністю обслуговування рівною μN де N – кількість агентів, μ – загальна обчислювальна продуктивність менеджера. Довжину черги можна вважати нескінченною, а час очікування – необмеженим. Оцінювання параметрів призводиться менеджером, а агенти передають тільки потоки результатів вимірювань. В цьому випадку загальна обчислювальна продуктивність менеджера розподіляється рівномірно на обслуговування всієї групи агентів. Менеджер та група агентів взаємодіють у формі упорядкованого опитування, яке організує полінгова система менеджера [7, 59, 80].

В даному випадку можна розглядати просту модель опитування або модель полінга, в якій опитування агентів менеджером проводиться послідовно. В цьому випадку логічна структура взаємодії «ME-агент-менеджер» має вигляд, показаний рисунку 2.9.

Допустимо, що на n входів агентів надходять потоки даних однакової розмірності з постійними інтенсивностями λ . Оцінку статистик виконує агент, а їх значення передаються менеджеру. Допустимо також, що агент має необхідний обчислювальний ресурс, за допомогою якого процес обчислень можливо розпаралелити, а час обчислень статистик не можна враховувати [1].

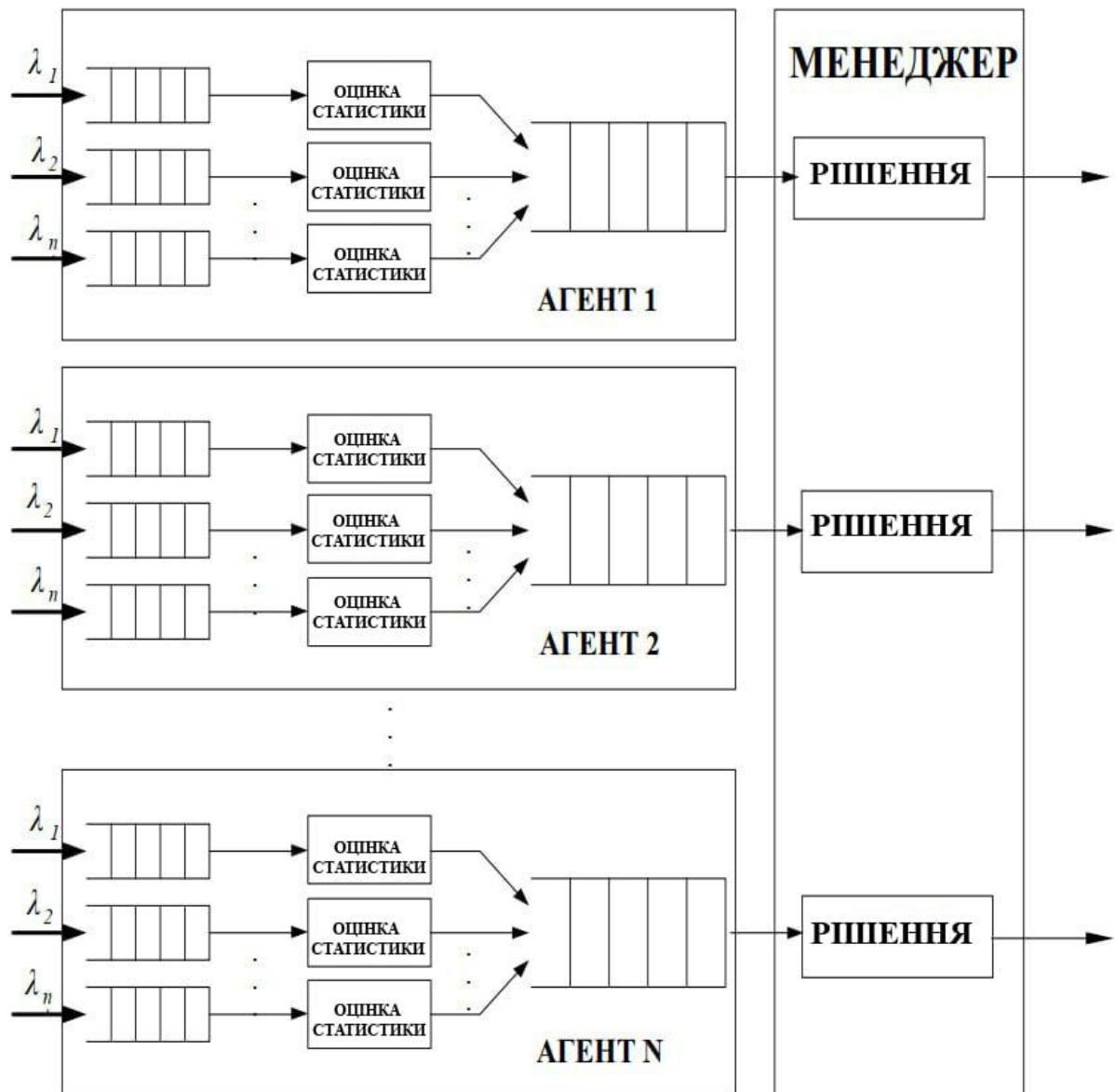


Рисунок 2.9 – Логічна структура взаємодії «МЕ–агент–менеджер»

Для нормального розподілу параметра трафіку з невідомим середнім та невідомою дисперсією справедливий вираз [89, 90]:

$$|\bar{x} - x^*| < \frac{t\bar{\sigma}}{\sqrt{v}} \quad (2.12)$$

де

- \bar{x} – оцінка математичного очікування невідомого параметра;
- x^* - справжнє значення математичного очікування параметра;
- t - коефіцієнт Стюдента;

- $\bar{\sigma}$ - оцінка середньоквадратичного відхилення оцінки параметра;
- ν - обсяг вибірки, на основі якої оцінюється значення параметра.

Тоді вираз для обсягу вибірки, необхідний для забезпечення заданої точності оцінки, має вигляд:

$$\nu = t^2 \hat{\sigma}^2 / \delta^2 \quad (2.16)$$

Попередньо проводять оцінку дисперсії $\hat{\sigma}^2$ за вибіркою з достатньою репрезентативністю [89, 90]:

Розглянемо два випадки :

1. Оцінюється параметр стаціонарної ергодичної некорельованої випадкової послідовності (ВП), за допомогою якої описується поведінка трафіку в МІС, наприклад, її математичне очікування. Припустимо, що попередньо була зроблена оцінка дисперсії ВП $\hat{\sigma}^2 = 1.0$. Нехай потрібно оцінити значення математичного очікування ВП з точністю $\delta \leq 0.01$. Тоді необхідний об'єм вибірки за довірчої ймовірності $P=0.95$ ($t=1.96$) буде дорівнювати $\nu=38416$ відліків ВП. В цьому випадку можливо усереднення за часом. Якщо припустити, що інтервал вимірювання становить 0.25 секунди, то необхідний час для оцінки параметра складе $\tau \cong 2.7$ години.

2. Оцінюється математичне очікування нестаціонарної нелінійної корельованої ВП. В цьому випадку усереднення можливо тільки по ансамблю реалізацій. Нехай потрібно оцінити значення математичного очікування ВП з точністю $\delta \leq 0.01$. Для прикладу припустимо, що ВП є процесом авторегресії першого порядку з кореляційною функцією виду:

$$R(k) = \rho^{|k|} = e^{-\alpha|k|} \quad (2.13)$$

де $\alpha = -\ln(\rho)$, ρ – коефіцієнт кореляції. Тоді одна реалізація являтиме собою вибірку із ВП величиною, яка визначається значенням l , за якої

$R(l) \approx 0.1$, тобто коли відліки ВП можна вважати практично некорельованими. Наприклад, при $\rho=0.99$, значення $l=230$ відліків, а при $\rho=0.999$ значення інтервалу кореляції одно $l=2301$ відліку. Нехай відліки ВП надходять на вхід агента з часовим інтервалом $\Delta t=0.001$ сек. Тоді час, збору даних складе $T_d = v * l = t^2 \hat{\sigma}^2 / \delta^2$. Характер цієї залежності від значення коефіцієнта кореляції, при різних значеннях дисперсії ВП, показаний рисунку 2.10.

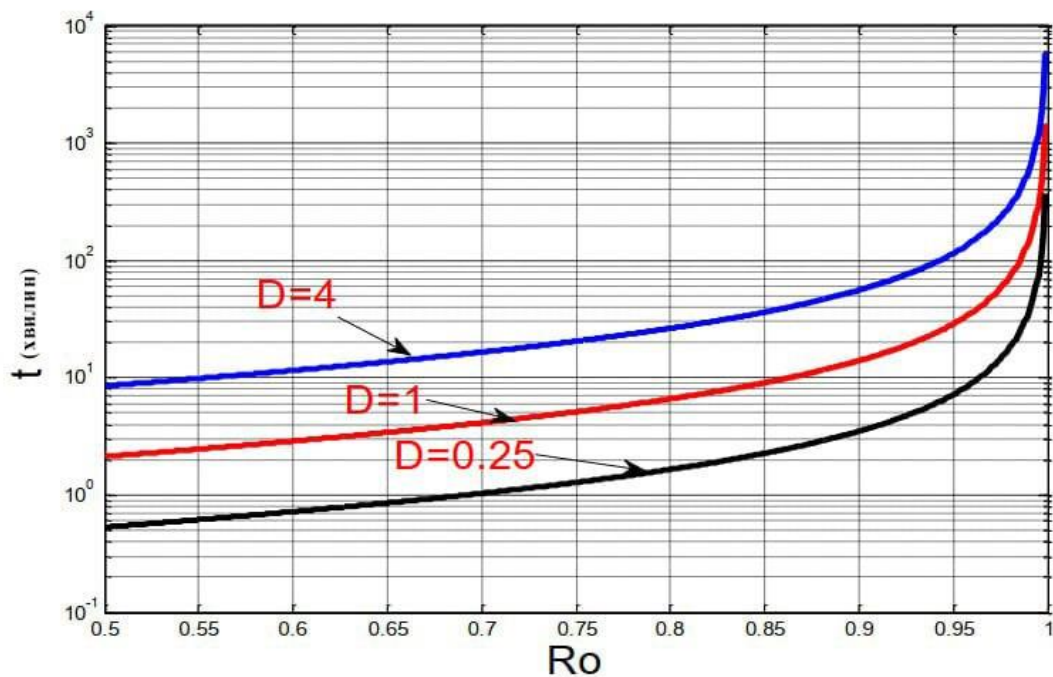


Рисунок 2.10 – Залежність часу збору даних від коефіцієнта кореляції для різних значень дисперсії ВП

Залежність часу збору даних від коефіцієнта кореляції при різних значеннях часових інтервалів Δt надходження вимірювань на вхід агента при одному і тому ж значенні дисперсії ВП представлено рисунку 2.11.

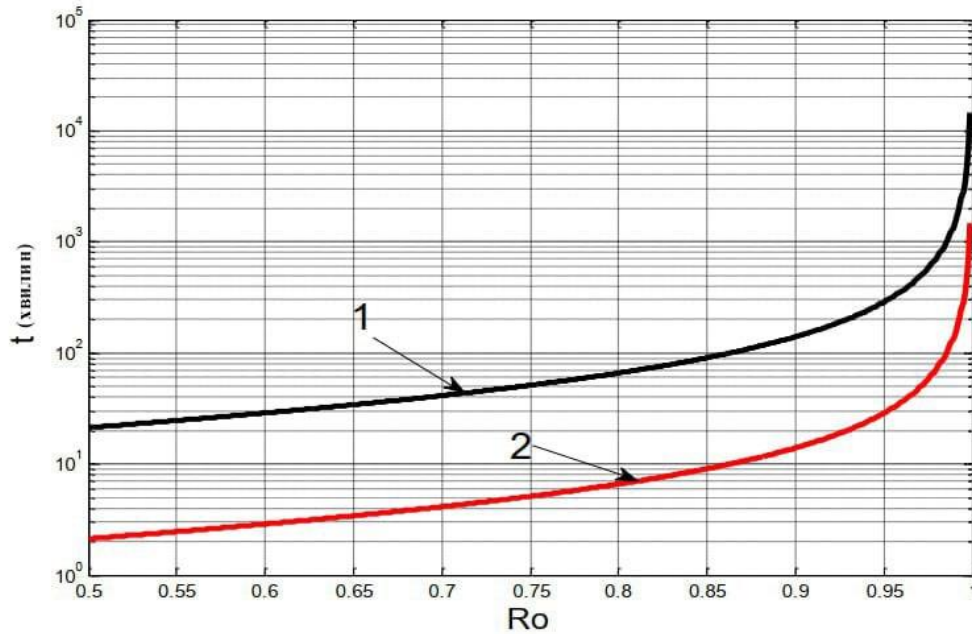


Рисунок 2.11 – Залежність часу збору даних від коефіцієнта кореляції при різних значеннях часових інтервалів Δt . 1- $\Delta t=0.001$ сек.
2- $\Delta t=0.001$ сек.

Аналіз даних, представлених цих рисунках, показує, що час оцінювання параметрів трафіку МІС може складати після перехідного періоду десятки хвилин, що не завжди прийнятно для забезпечення нормального функціонування МІС.

Зробимо оцінку часових обчислювальних витрат для запропонованого методу, заснованого на ієрархічних нечітких ситуаційних мережах (ІНСМ).

Обчислювальна складність алгоритмів нечіткого логічного висновку Мамдані або Такагі-Сугено складає близько $O(n^3)$ операцій, де n – розмірність вектора ознак [64, 86]. Нехай розмірність вектора ознак, що надходить на один вхід агента з інтерфейсу МЕ, становить 3, число інтерфейсів МЕ, моніторинг яких здійснює один агент, нехай буде рівним 12. Тоді загальна кількість ознак $n=36$. У цьому випадку час оцінки нечіткої ситуації для вироблення управлінського рішення, при середній обчислювальній продуктивності процесорного модуля ІА дорівнює 10 Гфлопс/сек, дорівнюватиме:

$$\bar{t}_{S_i} = \frac{36^3}{10 \cdot 10^9} \cong 5 * 10^{-6} \text{сек} \quad (2.14)$$

Звідси виходить, що ІА функціонує практично в режимі реального часу.

2.6 Висновки до другого розділу

В процесі розробки концептуальної моделі процесу оперативного оцінювання параметрів трафіку для автоматизованого управління якістю послуг у МІС були досягнуті наступні наукові результати:

Розроблена концептуальна модель процесу оперативного оцінювання параметрів трафіку для автоматизованого управління якістю послуг зв'язку у МІС. Технічна реалізація методів та алгоритмів, функціонування яких засноване на її принципах, дозволить оцінювати параметри мережевого трафіку в режимі часу близькому до реального з точністю, достатньою для прийняття об'єктивних рішень з управління якістю послуг зв'язку.

Проаналізовано системні та функціональні властивості ієрархічного управління. Розроблена ієрархічна структура оптимізаційних завдань ПОППР АСУЗ МІС, основним критерієм яких є критерій Парето.

Проведено аналіз видів невизначеностей та причин їх виникнення у даних мережевого моніторингу, які надходять для прийняття управлінських рішень у ПОППР АСУЗ МІС. Показано, що для підвищення оперативності та об'єктивності прийнятих рішень з управління якістю послуг зв'язку у даних умовах доцільно застосування методів штучного інтелекту, розроблених на основі ідеології ІНСМ та методів нечіткого математичного програмування.

Сформульовано системні та функціональні вимоги, яким повинна задовольняти технічна реалізація інтелектуального агента, що використовується для оцінки параметрів мережевого трафіку.

На основі результатів аналізу ієрархічної системи показників якості функціонування МІС, а також ієрархічної системи показників якості

функціонування ПОППР АСУЗ МІС, показано значення оперативного моніторингу параметрів мережевого трафіку для забезпечення заданих вимог до якості послуг зв'язку.

Розроблена базова системна та базова функціональна архітектури інтелектуального агента як елемента АСУЗ МІС. Розроблено алгоритм функціонування інтелектуального агента. Запропонована реалізація концепції застосування інтелектуальних агентів для управління якістю послуг зв'язку, що дозволяє створювати розподілену підсистему оперативної підтримки прийняття рішень АСУЗ МІС.

Отримано результати порівняльного аналізу ефективності, розробленої концептуальної моделі ПОППР АСУЗ МІС за критеріями оперативності та точності в порівнянні з існуючими статистичними методами оцінювання параметрів мережевого трафіку. Показано обмеження у реалізації статистичних методів оцінки параметрів трафіку в нестационарних умовах функціонування МІС.

3 МЕТОДИКА ОЦІНЮВАННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ТРАФІКУ В МУЛЬТИСЕРВІСНИХ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМАХ

3.1 Постановка завдання адаптивної оцінки параметрів трафіку в МІС

Зі збільшенням інтенсивності бізнес – процесів значно зростає об'єм переданого МІС інформаційного контенту, також зростає частка службового мережевого трафіку, ускладнюються динамічні процеси в мережах , що входять до складу МІС. З'являються особливості поведінки мережевого трафіку з апіорі невідомими властивостями. Адекватний математичний опис його поведінки, як показано в роботах [2, 6, 11, 61,62], можливий тільки на основі моделей нестационарних та нелінійних випадкових послідовностей, з урахуванням фрактальних або хаотичних властивостей поведінки трафіку [61,62].

На даний час, багато мережевих і телекомунікаційних програм використовують достатньо спрощені математичні моделі поведінки мережевого трафіку, які призводять до суттєвих спотворень в оцінках його параметрів, необхідних для вироблення раціональних рішень для оперативного управління мережею і, зокрема, для оперативного управління QoS. Наприклад, висувуються припущення про стаціонарність його поведінки, що практично не відбувається на практиці, значно звужуються класи законів імовірнісних розподілів параметрів трафіку. У більшості практичних випадків обмежуються пуассонівським розподілом, що також призводить до значних похибок в оцінці параметрів, застосовуваних для управління QoS .

У відомих роботах [61, 93, 94] зазначається, що подібна поведінка мережевого трафіку може бути викликана різними причинами, повний перелік яких на даний час до кінця не вивчений. Тим не менш , деякі з них можуть бути вказані. Наприклад, до них можна віднести процеси об'єднання безлічі окремих, сильно мінливих ON/OFF джерел, які мають імовірнісні розподіли з так званими "важкими хвостами" або хвостовий розподіл (PBX). Відзначимо,

що випадкова величина X має імовірнісний розподіл із «важким хвостом» $F(x)$, якщо [61, 93, 94]:

$$P\{X > x\} = 1 - F(x) = gx^{-\alpha}L(x) \quad (3.1)$$

де $0 < \alpha < 2$ – параметр форми («індекс хвоста»), g – позитивна константа, $L(*)$ -повільно змінювальна функція, тобто для $\forall x > 0$ виконується вимога:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \frac{L(tx)}{L(x)} = 1 \quad (3.2)$$

Особливістю РТХ є те, що їх кореляційні властивості мають характер гіперболічної залежності. Наприклад, розподіл Парето належить до класу РТХ. На відміну від РТХ, розподіли із «легкими хвостами» (РЛХ), до яких належать, наприклад, нормальний розподіл, експоненціальний розподіл, мають експоненційно спадаючу кореляційну функцію. Розподіл Вейбулла, логарифмічно нормальний розподіл мають субекспоненційно спадаючі «хвости» і мають кінцеву дисперсією [61, 93].

До основних причин, що впливають на характер поведінки трафіку, також можна віднести роботу додатків на основі технологій «клієнт - сервер», процеси агрегування та виділення мережевих потоків, процедури мережевого управління, функціонування механізмів управління мережевими потоками з нелінійним зворотнім зв'язком, процеси мережевого масштабування, характер поведінки абонентів мережі, а також багато інших мережевих явищ [61, 93, 94].

У дослідженнях [93, 94] зазначається, що результати вимірювань у каналах мультисервісних мереж зв'язку показали, що в агрегованому мережевому трафіку (регіональні і транспортні компоненти МІС) переважають трафік Web-додатків, у яких домінує протокол TCP ($\approx 95\%$), що має нелінійний характер який керує зворотнім зв'язком. Там же зазначається,

що трафік, інтенсивність якого не перевищує $\approx 30\%–40\%$ від пропускної здатності каналу зв'язку, практично не буває стаціонарним. Основні закони розподілу значень інтенсивності трафіку в мультисервісних мережах зв'язку, якими можуть бути апроксимовані реальні розподіли, наведені в таблиці 3.1 [61, 62, 93].

Таблиця 3.1 - Основні закони розподілів трафіку в МІС

№	Закон розподілу	Щільність розподілу ймовірності $p(x)$	Математичне очікування m_x , дисперсія σ_x^2
1	Експоненсіальний	$\lambda e^{-\lambda x}, x \geq 0$	$m_x = \frac{1}{\lambda}, \sigma_{m_x}^2 = \frac{1}{\lambda^2}$
2	Логарифмічно-нормальний	$\frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\ln x - \alpha)^2}{2\sigma^2}\right)$	$m_x = e^{a+0.5\sigma^2}$ $\sigma_{m_x}^2 = e^{2a+\sigma^2} \cdot (e^{\sigma^2} - 1)$
3	Пуасона	$P(k) = \frac{\lambda^k}{k!} \cdot e^{-\lambda}$	$m_x = \frac{1}{\lambda}, \sigma_{m_x}^2 = \frac{1}{\lambda}$
4	Парето	$\frac{a}{x_0} \left(\frac{x_0}{x}\right)^{a+1}, x > x_0$	$m_x = \frac{a}{a-1}$ $\sigma_{m_x}^2 = \begin{cases} \frac{a}{(a-1)^2(a-2)} x_0, a > 2 \\ \infty, a < 2 \end{cases}$
5	Вейбула	$\begin{cases} \alpha\beta x^{\alpha-1} \exp(-\beta x^\alpha), x > 0 \\ 0, x \leq 0 \end{cases}$	$m_x = \Gamma\left(1 + \frac{1}{\alpha}\right) \beta^{-\frac{1}{\alpha}}$ $\sigma_{m_x}^2 = \beta^{-\frac{2}{\alpha}} \left\{ \frac{2}{\alpha} \Gamma\left(\frac{2}{\alpha}\right) - \frac{1}{\alpha^2} \left[\Gamma\left(\frac{1}{\alpha}\right)\right]^2 \right\}$ де: $\Gamma(x) = \int_0^\infty e^{-t} t^{x-1} dt$

Важливою особливістю поведінки трафіку є те, що параметри наведених у таблиці 3.1 розподілів також можуть бути випадковими послідовностями (ВП) з апіорі невідомими статистичними характеристиками [2].

До іншої важливої особливості імовірнісних властивостей трафіку слід віднести те, що його поведінка має марківську властивість, яка в найпростішому випадку визначається як [88 - 90]:

$$p(x_i/x_1, x_2, \dots, x_{i-1}) = p(x_i/x_{i-1}) \quad (3.3)$$

де $p(x_i/x_{i-1})$ - густина розподілу ймовірності (ГРЙ) значення ВП в момент часу i .

У завданнях оцінки параметрів мережевого трафіку необхідно враховувати зміни в часі оцінюваних параметрів. Таким чином, основною метою аналізу послідовності спостережень x_1, x_2, \dots, x_n є оцінки параметрів $\hat{\theta}_1, \hat{\theta}_2, \dots, \hat{\theta}_m$ що змінюються в часі, необхідних для рішення задач оперативного управління мережею. В цьому випадку з кожним наступним спостереженням x_i зв'язується нове значення параметра $\hat{\theta}_i$, тобто спостереження розглядаються як функції $x_i = \vartheta(\theta_i n_i)$ змінних параметрів θ_i , а також помилок спостережень та оцінювання n_i . Подібні підходи до рішення задач оцінювання носять назву рекурентних методів оцінювання [95, 96]. Відмітимо, що послідовності оцінюваних змінних у часі параметрів $\hat{\theta}_1, \hat{\theta}_2, \dots, \hat{\theta}_m$ також представні у вигляді ВП і найбільш зручним їх математичним поданням є марківське ВП (3.3) [95, 96].

Таким чином, завдання оцінки параметрів трафіку МІС зводиться до завдання рекурентного оцінювання параметрів адитивно-мультиплікативної негасівської марківської ВП з апріорі невідомими імовірнісними характеристиками у реальному масштабі часу.

3.2 Аналіз основних методів та алгоритмів оцінювання параметрів трафіку в мультисервісних інформаційних системах

Існують різні методи та алгоритми оцінки параметрів нелінійних та нестационарних випадкових процесів та послідовностей [95, 96]. Найбільш відомими з них є методи лінійаризованої та розширеної Колмановської фільтрації, а також методи нелінійної фільтрації [95, 96].

У цих методах використовується баєсовий метод оцінки параметрів ВП. Баєсовий метод використовується коли оцінювані параметри є випадковими

величинами або ВП, що мають спільну. В цьому випадку апостеріорна ГРЙ має вигляд:

$$p(\bar{\theta}_m/\bar{x}_n) = \frac{p(\bar{\theta}_m)}{p(\bar{x}_n)} p(\bar{x}_n/\bar{\theta}_m), \quad (3.4)$$

де $p(\bar{\theta}_m) = p(\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_m)$ - апіорна спільна ГРЙ оцінюваних параметрів; $p(\bar{x}_n) = p(x_1, x_2, \dots, x_n)$ - спільна ГРЙ спостережень. Отже, оцінювання має виконуватися таким чином, щоб отримані оцінки максимізували апостеріорну ГРЙ (АГРЙ) (3.4), яка називається оцінкою максимуму апостеріорної ймовірності (МАЙ - оцінкою) [96, 97].

Суть байєсонівського оцінювання полягає в наступному.

1. Вибирається функція втрат $V_p(\hat{\theta}, \theta)$, яка досягає мінімуму при $\hat{\theta} = \theta$. Найбільш поширеними є три виду функції втрат [89, 95, 96]:

- квадратична функція $V_p(\hat{\theta}, \theta) = (\hat{\theta} - \theta)^2 = e^2$;
- модуль різниці $V_p(\hat{\theta}, \theta) = |\hat{\theta} - \theta| = |e|$;
- обмежена рівномірна функція $V_p(\hat{\theta}, \theta) = \begin{cases} 0, & \text{при } |\hat{\theta} - \theta| \leq \varepsilon \\ 1, & \text{при } |\hat{\theta} - \theta| > \varepsilon \end{cases}$

2. Вводиться функція ризику $R(\hat{\theta}/\theta)$ як:

3.

$$R(\hat{\theta}/\theta) = \int_{-\infty}^{\infty} \dots \int_{-\infty}^{\infty} V_p[\varphi(\bar{x}_n, \theta)] \times p(\bar{x}_n/\theta) d\bar{x}_n \quad (3.5)$$

4. Обчислюється оцінка безумовного середнього ризику або байєсонівського ризику для оцінки $\hat{\theta} = \varphi(\bar{x}_n)$ у вигляді:

5.

$$\begin{aligned} \bar{V}_p[\varphi(\bar{x}_n)] &= E[V_p(\hat{\theta}, \theta)] = \\ \int_{-\infty}^{\infty} R(\hat{\theta}/\theta) \times p(\theta) d\theta &= \int_{-\infty}^{\infty} \int D_x V_p[\varphi(\bar{x}_n)] p(\bar{x}_n, \theta) d\bar{x}_n d\theta \quad (3.6) \end{aligned}$$

Функція вибірки $\varphi(\bar{x}_n)$, мінімізуюча значення $\bar{V}_P[\varphi(\bar{x}_n)]$ називається байєсонівською оцінкою параметра θ , а значення \bar{V}_{Pmin} називається байєсонівським ризиком [89, 95, 96].

б. Враховуючи вираз (3.4), знаходимо вираз для безумовного середнього байєсонівського ризику у вигляді:

$$\bar{V}_P[\varphi(\bar{x}_n)] = \int_{-\infty}^{-\infty} \dots \int_{-\infty}^{\infty} p(\bar{x}_n) d\bar{x}_n \times \int_{-\infty}^{\infty} V_P[\varphi(\bar{x}_n)/\theta] p(\bar{x}_n/\theta) d\theta \quad (3.7)$$

Вводячи функцію умовного ризику у вигляді:

$$W(\hat{\theta}/\bar{x}_n) = \int_{-\infty}^{\infty} V_P[\varphi(\hat{\theta}, \theta)] \cdot p(\theta/\bar{x}_n) d\theta \quad (3.8)$$

отримуємо значення безумовного середнього ризику внаслідок усереднення умовного ризику:

$$\bar{V}_P[\varphi(\bar{x}_n)] = M_x\{V_P[\varphi(\bar{x}_n)/\bar{x}_n]\} \quad (3.9)$$

Отже, для знаходження оцінки $\hat{\theta}$, яка задовольняє байєсонівський критерій, необхідно знайти оцінку, яка забезпечує мінімум значенням умовного ризику. Для безперервної функції умовного ризику така оцінка знаходиться як корінь рівняння $dW(\hat{\theta}/\bar{x}_n)/d\hat{\theta}$ [95, 96].

Подібна задача має більш просте рішення для квадратичної функції втрат [95, 96]. Оцінка, яку ми шукаємо розраховується як умовне середнє значення оцінюваного параметра θ .

Слід відзначити, що для функції втрат $V_P(\hat{\theta}, \theta) = |\hat{\theta} - \theta|$ оптимальною оцінкою є медіана АГРЙ $p(\theta/\bar{x}_n)$ [95, 96]. Для функції втрат рівномірної на інтервалі, оцінка, яку ми шукаємо, що мінімізує умовний ризик, збігається з модою АГРЙ $p(\theta/\bar{x}_n)$ оцінкою максимуму АГРЙ. Для гаусівської АГРЙ усі три оцінки збігаються [95, 96]. У переважній частині практичних випадків

застосовується квадратична функція втрат, коли оцінка параметра, яку ми отримали збігається з його математичним очікуванням [95, 96].

Як відомо з [95, 96], якість оцінок невідомих параметрів визначають за допомогою таких характеристик як незсувність, спроможність та ефективність.

Розглянемо коротко основні методи рекурентного оцінювання невідомих параметрів ВП. До основного з цих методів відноситься метод лінеаризованої Колмановської фільтрації [95, 96], суть якого полягає в наступному. Його основою є метод оптимальної Колманівської фільтрації [95, 96]. В даному випадку необхідно знайти оптимальні середньоквадратичні оцінки значень ВП $\{x_n\} \forall n$, які задовольняють різницеве стохастичне рівняння:

$$x_{n+1} = A_n x_n + B_n \xi_n, n \geq 1, x_0 = \gamma \quad (3.10)$$

де $\gamma \sim N(m_\gamma, R_\gamma)$, $\{\xi_n\}$ – дискретний векторний гауссівський білий шум, $M\{\xi_n\} = m_\xi(n)$, $cov(\xi_n, \xi_n) = D_\xi(n)$; $cov(\xi_n, \xi_k) = 0$, якщо $n \neq k$. Передбачається, що γ та $\{\xi_n\}$ – незалежні випадкові величини. $\{A_n\}$ та $\{B_n\}$ – послідовності невинуватих матриць. З урахуванням лінійності (3.10), можна зробити висновок про гауссівський розподіл ВП x . Нехай модель спостережень ВП x_n має вигляд:

$$y_n = C_n x_n + u_n, n = 1, 2, \dots, \quad (3.11)$$

де y_n - вектор спостережень в момент n ; C_n - відома невинуваткова матриця; $\{u_n\}$ - гауссівська ВП помилок спостережень. Передбачається, що $\{u_n\}$ – векторний дискретний білий шум; $M\{u_n\} = m_u(n)$, $cov(u_n, u_n) = D_u(n)$, причому $D_u(n)$ – невинуваткова (несингулярна) матриця. Зробимо припущення про те, що ВП $\{u_n\}$ не залежить від ВП $\{\xi_n\}$. Як відомо з [95, 96], рівняння (3.10) та (3.11) описують динамічну модель спостережень Калмана.

Оптимальна середньоквадратична оцінка \hat{x}_n для x_n за спостереженнями y_n знаходиться як [95, 96]:

$$\begin{aligned}\hat{x}_n &= \bar{x}_n + \bar{P}_n C_n^T (C_n \bar{P}_n C_n^T + D_v(n))^{-1} (y_n - C_n \bar{x}_n - m_v(n)), n \geq 1, \\ \hat{x}_0 &= m_\gamma; \bar{x}_n = A_n \hat{x}_{n-1} + B_n m_\xi(n); \bar{P}_n = A_n \hat{P}_{n-1} A_n^T + B_n D_\xi(n) B_n^T. \quad (3.12)\end{aligned}$$

Матриця \bar{P}_n це коваріаційна матриця помилки оцінювання $\Delta \hat{x}_n = x_n - \hat{x}_n$, тобто $\bar{P}_n = cov(\Delta \hat{x}_n, \Delta \hat{x}_n)$, яка визначається за допомогою різницевого матричного рівняння :

$$\hat{P}_n = \bar{P}_n - \bar{P}_n C_n^r (C_n \bar{P}_n C_n^r + D_v(n))^{-1} C_n \bar{P}_n, n \geq 1, \hat{P}_0 = R_\gamma \quad (3.13)$$

Рекурентні рівняння (3.12) та (3.13) у теорії стохастичних систем називаються оптимальним дискретним фільтром Калмана [95, 96].

Якщо ввести значення $k_n = \bar{P}_n C_n^r (C_n \bar{P}_n C_n^r + D_v(n))^{-1}$, то рівняння фільтра Калмана можна записати в компактному вигляді: \bar{x}_n

$$\begin{aligned}\hat{x}_n &= \bar{x}_n + k_n (y_n - C_n \bar{x}_n - m_v(n)), \hat{x}_0 = m_\gamma; \\ \hat{P}_n &= (I - k_n C_n) \bar{P}_n, \hat{P}_0 = R_\gamma\end{aligned} \quad (3.14)$$

де I – одинична матриця, а k_n - називається матричним коефіцієнтом посилення фільтра.

Перехід до методу лінеаризованої Колмановської фільтрації проводиться в такий спосіб [95, 96]. Розглядається модель спостережень виду:

$$\begin{aligned}x_{n+1} &= A_n x_n + U_n + B_n \xi_n, n \geq 1, \hat{x}_0 = m_\gamma; \\ y_n &= C_n x_n + W_n + D_n v_n, n = 1, 2, \dots\end{aligned} \quad (3.15)$$

де ξ_n та v_n – незалежні стандартні білі гауссівські шуми; $\gamma \sim N(m_\gamma, R_\gamma)$ – вектор початкових умов, що не залежить від ξ_n та v_n ; $\{A_n, B_n, C_n, D_n\}$ – відомі матриці, причому виконується умова $D_n D_n^T > 0, \forall n$; $\{U_n, W_n\}$ – відомі вектори. У цьому випадку середньоквадратична оптимальна оцінка обчислюється як [95, 96]:

$$\begin{cases} \hat{x}_n = \bar{x}_n + k_n(y_n - C_n \bar{x}_n - W_n), \hat{x}_0 = m_\gamma \\ \bar{x}_n = A_n \hat{x}_{n-1} + U_n \\ k_n = \bar{P}_n C_n^T (C_n \bar{P}_n C_n^T + D_n D_n^T)^{-1}, \\ \begin{cases} \hat{P}_n = (I - k_n C_n) \bar{P}_n, \hat{P}_0 = R_\gamma \\ \bar{P}_n = A_n \hat{P}_{n-1} A_n^T + B_n B_n^T \end{cases} \end{cases} \quad (3.16)$$

Для побудови наближених оцінок процесу $\{x_n\}$ у разі нелінійної різницевої стохастичної моделі спостережень, маємо співвідношення:

$$\begin{aligned} x_{n+1} &= a_n(x_n) + u_n + B_n \xi_n, n \geq 1, x_0 = \gamma; \\ y_n &= c_n(x_n) + w_n + D_n v_n, n = 1, 2, \dots, \end{aligned} \quad (3.16)$$

де $a_n(x_n)$ та $c_n(x_n)$ – відомі нелінійні диференційовані функції; U_n та W_n – відомі вектори. Робимо припущення про наявність для ВП $\{x_n\}$ опорної траєкторії $\{x_n^0\}$, такий, що $M\{|x_n - x_n^0|^2\} \ll 1$, тобто є траєкторія, яка досить точно апроксимує процес $\{x_n\}$. Далі виконується лінеаризація моделі (3.17) за допомогою розкладання нелінійних функцій у ряд Тейлора біля опорного значення x_n^0 , та відкидаючи члени другого і вищих порядків у вигляді:

$$\begin{aligned} x_n &= a_n(x_n^0) + \left. \frac{\partial a_n}{\partial x} \right|_{x_{n-1}^0} \times (x_{n-1} - x_{n-1}^0) + u_n + B_n \xi_n = A_n x_n + U_n + B_n \xi_n, \\ \text{де: } A_n &= \left. \frac{\partial a_n}{\partial x} \right|_{x_{n-1}^0}, U_n = a_n(x_{n-1}^0) - A_n x_{n-1}^0 + u_n. \end{aligned} \quad (3.18)$$

Аналогічно для процесу спостереження маємо :

$$y_n = c_n(x_n^0) + \frac{\partial c_n}{\partial x} \Big|_{x_{n-1}^0} \times (x_{n-1} - x_{n-1}^0) + w_n + D_n v_n = C_n X_n + W_n + D_n v_n,$$

$$C_n = \frac{\partial c_n}{\partial x} \Big|_{x_{n-1}^0}, W_n = c_n(x_{n-1}^0) - C_n x_n^0 + w_n \quad (3.19)$$

Оцінка \hat{x}_n може бути обчислена за допомогою виразу (3.16). Параметри $\{A_n, B_n, C_n, D_n\}$ – визначаються за допомогою виразів (3.18) та (3.19). Такий алгоритм (3.16) – (3.19) називають алгоритмом субоптимальної нелінійної фільтрації першого порядку [95, 96]. Якщо у (3.17) використовуються значення $\{x_n^0\}$, то такий алгоритм називають лінеаризованим фільтром Калмана (ЛФК) [95, 96]. Якщо в якості $\{x_{n-1}^0\}$, обирається \hat{x}_{n-1} , то такий алгоритм називається розширеним фільтром Калмана (РФК) [95, 96].

До особливостей цих методів можна віднести те, що результуючі їх точнісні характеристики суттєво залежать від можливих величин збурень, а також від характеристик нелінійностей оцінюваних параметрів [95, 96].

Слід зазначити, що ЛФК та РФК не є оптимальними алгоритмами [110, 111]. Застосування цих алгоритмів для оцінки параметрів трафіку у високошвидкісних МІС пов'язано зі значними обчислювальними витратами, які необхідні для попереднього налаштування параметрів цих алгоритмів за допомогою методів математичного моделювання, що у свою чергу, викликають проблеми при їх технічній реалізації. Крім цього, поведінка мережевого трафіку може характеризуватися як раптовою (стрибкоподібною) зміною його характеристик, так і плавними розладками характеристик ВП, що також викликає великі алгоритмічні складності при їх технічній реалізації [94, 95, 96].

Відмітимо, що крім ЛФК та РФК існують різні методи та алгоритми нелінійною фільтрації [95, 97, 98], які засновані на попередньому оцінюванні

умовних щільностей розподілу ВП $\{\hat{x}_n\}$ та на попередньому оцінюванні значень умовних підступів ВП, що також викликає труднощі з обчисленням [95].

[97, 99, 100] показано, що одним з конструктивних підходів до вирішення завдання оцінки параметрів випадкових процесів при нелінійних та нестационарних моделях спостережень, є метод умовної нелінійної Парето – оптимальної фільтрації В.С. Пугачова, в якому застосовується двоетапна оцінка невідомого параметру. На першому етапі обчислюється функція поточного прогнозу оцінки параметра. На другому етапі за допомогою коригувальних функцій та отриманої додаткової апостеріорної інформації про значення цих оцінок проводять їх корекцію [97, 99, 100].

3.3 Розробка алгоритмів оцінки параметрів трафіка у мультисервісних інформаційних системах

Нехай спостереження значень інтенсивності трафіку МІС на інтерфейсі мережевого елемента (МЕ) можуть бути представлені у вигляді ВП $x(i)$, заданої в моменти часу $i=\{1,2,\dots,n,\dots\}$. Нехай спостереження ВП $x(i)$, представляються адитивно-мультиплікативною моделлю виду [69, 116 – 119]:

$$x(i) = \beta(i) * F(x(s - 1) + \xi(i)), \quad (3.20)$$

де $F\{*\}$ – деяка випадкова функція від спостережень, $\beta(i)$ - деяка випадкова величина, а $\xi(i)$ – перешкода спостережень з нульовим математичним очікуванням та кінцевою дисперсією. Нехай ВП $x(i)$ має кінцеві математичне очікування та дисперсію. Зазначимо, що модель (3.20) і зроблені припущення визначають негаусівську, нестационарну марківську послідовність [95 - 98].

Потрібно побудувати векторну рекурентну процедуру оцінки значень математичного очікування ВП $x(i)$, СКВ ВП і його коефіцієнта варіації за критерієм мінімуму середнього квадрата помилки, тобто:

$$J(i) = M\{\bar{\varepsilon}\} \left\{ M(m(i) - \hat{m}(i))^2 \rightarrow \min, M(\sigma(i) - \hat{\sigma}(i))^2 \rightarrow \min, M(K_v(i) - \hat{K}_v(i))^2 \rightarrow \min \right\} \quad (3.21)$$

де $\hat{m}(i)$, $\hat{\sigma}(i)$, $\hat{K}_v(i)$ – оцінки математичного очікування, СКВ та коефіцієнта варіації ВП $x(i)$ на кроці i , а $m(i)$, $\sigma(i)$, $K_v(i)$ істинні значення.

Функцію прогнозу для значення математичного очікування ВП на кроці i визначимо у вигляді [2, 97, 99]:

$$\hat{m}(i) = \frac{1}{N_1} \sum_{k=1}^{N_1} x(i-k), i = 1, 2, \dots, n, \dots \quad (3.22)$$

де N_1 – розмір ковзного вікна, який вибирається відносно невеликого розміру [2].

Прогнози оцінок СКВ та коефіцієнта варіації ВП на кроці i також виробляються в цьому ж ковзному вікні та мають вигляд:

$$\hat{\sigma}(i) = \sqrt{\frac{1}{N_1} \sum_{k=1}^{N_1} x^2(i-k) - \left(\frac{1}{N_1} \sum_{k=1}^{N_1} x(i-k) \right)^2}, i = 1, 2, \dots, n, \dots, \hat{K}_v = \frac{\hat{\sigma}(i)}{\hat{m}(i)} \quad (3.23)$$

Подальший розгляд побудови коригуючої процедури проведемо для компоненти значення оцінки математичного очікування функціоналу (3.21) $J_m(\hat{m}(i))$ з узагальненням на векторний випадок.

Як правило, значення функціоналу $J_m(\hat{m}(i))$ недоступне спостереженню, а доступна спостереженню тільки випадкова реалізація його градієнта з випадковою помилкою, тобто [102-104]:

$$\nabla Q(\xi \hat{m}(i)) = \nabla J_m(\hat{m}(i)) + \xi(i), \xi \in R, \quad (3.24)$$

де ξ – помилка спостереження градієнта.

Припустимо, що ξ – центровані, некорельовані помилки оцінки градієнта функціоналу якості. Мінімізацію функціоналу (3.24) проведемо за допомогою рекурентного алгоритму виду [2, 97, 99]:

$$\widehat{m}(i+1) = \widehat{m}(i) + \lambda_m(i+1) \nabla Q(\xi, \widehat{m}(i+1)) \quad (3.25)$$

де $\nabla Q(\xi, \widehat{m}(i+1))$ – деякий випадковий напрямок руху у фазовому просторі в точці $\widehat{m}(i+1)$; \widehat{m} – скоригована оцінка математичного очікування на попередньому кроці; $\{\lambda_m\}$ – послідовність позитивних чисел, які для стаціонарної ВП, повинні задовольняти умови [102-104]:

$$\sum_{i=1}^{\infty} \lambda_m(i) = \infty, \quad \sum_{i=1}^{\infty} \lambda_m^2(i) < \infty, \quad (3.26)$$

де $\lambda_m(i)$ – коефіцієнти кроку алгоритму. Як відомо, вектор $\nabla Q(\xi, \widehat{m}(i+1))$ називається псевдоградієнтом у точці $\widehat{m}(i)$, якщо в цій точці виконується умова [102-104]:

$$\nabla J_m(\widehat{m}(i-1)) \cdot M\{\nabla Q(\xi, \widehat{m}(i))\} \geq 0, \quad (3.27)$$

де $M\{*\}$ – операція математичного очікування. Реалізацію функціоналу якості у точці $\widehat{m}(i+1)$ можна представити у вигляді [2]:

$$Q(\widehat{m}(i+1)) = (\widehat{m}(i+1) - \widehat{m}(i))^2 \quad (3.28)$$

Тоді, після нескладних перетворень, рекурентний псевдоградієнтний алгоритм (ПГА) [102-104] оцінювання поточного значення математичного очікування ВП, з урахуванням знаків, буде мати вигляд:

$$\hat{m}(i+1) = \hat{m}(i) + \lambda_m(i+1) \left(\hat{m}(i+1) - \hat{m}(i) \right). \quad (3.29)$$

З метою зменшення середньої відносної помилки оцінки математичного очікування інтенсивності трафіку в МІС пропонується коригуюча процедура (3.29) побудована на основі середнього значення попередніх оцінок, як [2, 97, 99]:

$$\check{m}(i) = \frac{1}{N_2} \sum_{k=0}^{N_2-1} \hat{m}(i-k). \quad (3.30)$$

де N_2 – розмір другого ковзного вікна, в якому проводиться усереднення оцінок математичного очікування інтенсивності трафіку, а $\hat{m}(i)$ – середнє значення оцінок у цьому ковзному вікні. Тоді вираз (3.29) набуде вигляду:

$$\hat{m}(i+1) = \hat{m}(i) + \lambda_m(i+1) \times \left[\hat{m}(i+1) - \frac{1}{N_2} \sum_{k=0}^{N_2-1} \hat{m}(i-k) \right]. \quad (3.31)$$

У скороченому вигляді (3.31) можна записати як:

$$\hat{m}(i+1) = \hat{m}(i) + \lambda_m(i+1) \quad (3.32)$$

Аналогічний підхід застосовується для всіх компонентів вектора $\nabla Q(\xi \hat{m}(i))$. Узагальненням рекурентної процедури (3.32) є векторний ПГА виду:

$$\hat{G}(i+1) = \hat{G}(i) + R(i+1) \times \nabla Q(i+1), \quad (3.33)$$

де $\hat{G}(i + 1)$ – вектор оцінок параметрів СП на кроці $i + 1$:

$$\hat{G}(i + 1) = [\hat{m}(i + 1), \hat{\sigma}(i + 1), \hat{K}v(i + 1)]^T, \quad (3.34)$$

Матриця $R(i + 1)$ є діагональною матрицею коефіцієнтів кроку .

Зазначимо одну важливу властивість запропонованого алгоритму: його структура залежить від статистичних характеристик ВП $x(i)$. Це властивість ПГА є наслідком центральної граничної теореми [89, 104]. Таким чином, для будь-яких імовірнісних характеристик інтенсивності мережевого трафіку, структура алгоритму оцінки постійна, а змінюватися можуть тільки його параметри.

Для оцінювання параметрів нестационарних ВП умова (3.26) обмежує застосування ПГА, так як ПГА повинен відстежувати зміни значення параметрів трафіку, а не сходиться до певних їх значенням. Тому значення членів послідовності $R(i)$ обмежуються знизу постійними значенням. Як наслідок вибору обмеженого коефіцієнта кроку, дисперсія оцінки параметрів ВП також буде обмежена знизу. Отже, необхідно знайти компромісне рішення між швидкістю та точністю оцінювання значень інтенсивності ВП [2, 102-104].

У розробленому алгоритмі пропонується при виборі вектора коефіцієнтів кроку враховувати динаміку зміни оцінюваних параметрів та характеристик ВП. Очевидно, що модулі градієнтів компонент векторного функціоналу якості пропорційні динамічним властивостям ВП. Подібні залежності носять характер завдань, що важко формуються, тому пропонується процедура підстроювання коефіцієнтів кроку ПГА автоматизувати на основі методу нечіткого висновку Такагі – Сугено або на основі його виду –синглтоного методу [64, 70, 106], що має вигляд:

$$\begin{aligned} &\text{якщо } \langle \hat{m}(i) \in D1 \rangle \text{ ТА } \langle \nabla Q(i) \in D2 \rangle \text{ ТА } \langle \hat{\sigma}^2(i) \in D3 \rangle \\ &\text{тоді } R(i + 1) = R(k) \\ &\text{та } N_1 = N_1(k) \text{ ТА } N_2 = N_2(k) \end{aligned} \quad (3.35)$$

де $D1$, $D2$ та $D3$ – області поточних значень оцінки математичного очікування ВП, оцінки значень компонент градієнта в коригувальній процедурі (3.33) та оцінки дисперсії ВП, N_1 та N_2 – розміри відповідних ковзаючих вікон у виразах (3.22), (3.31) та (3.33).

Структура алгоритму оцінки параметрів трафіку наведено рисунку 3.1.

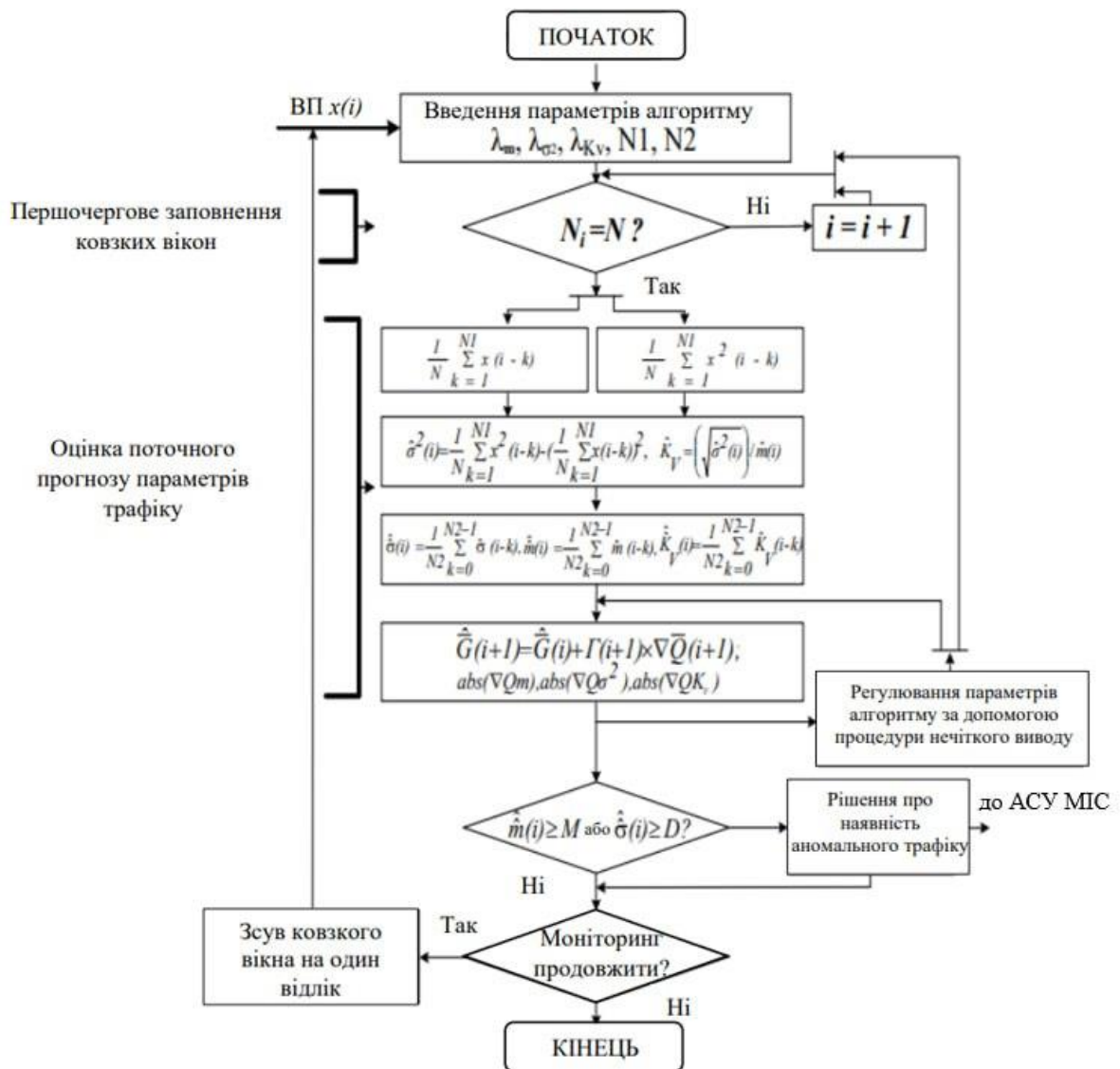


Рисунок 3.1 – Структура алгоритму оцінки параметрів трафіку

Структура системи нечіткого логічного виводу для регулювання параметрів алгоритму оцінки характеристик трафіку МІС наведено рисунку 3.2.

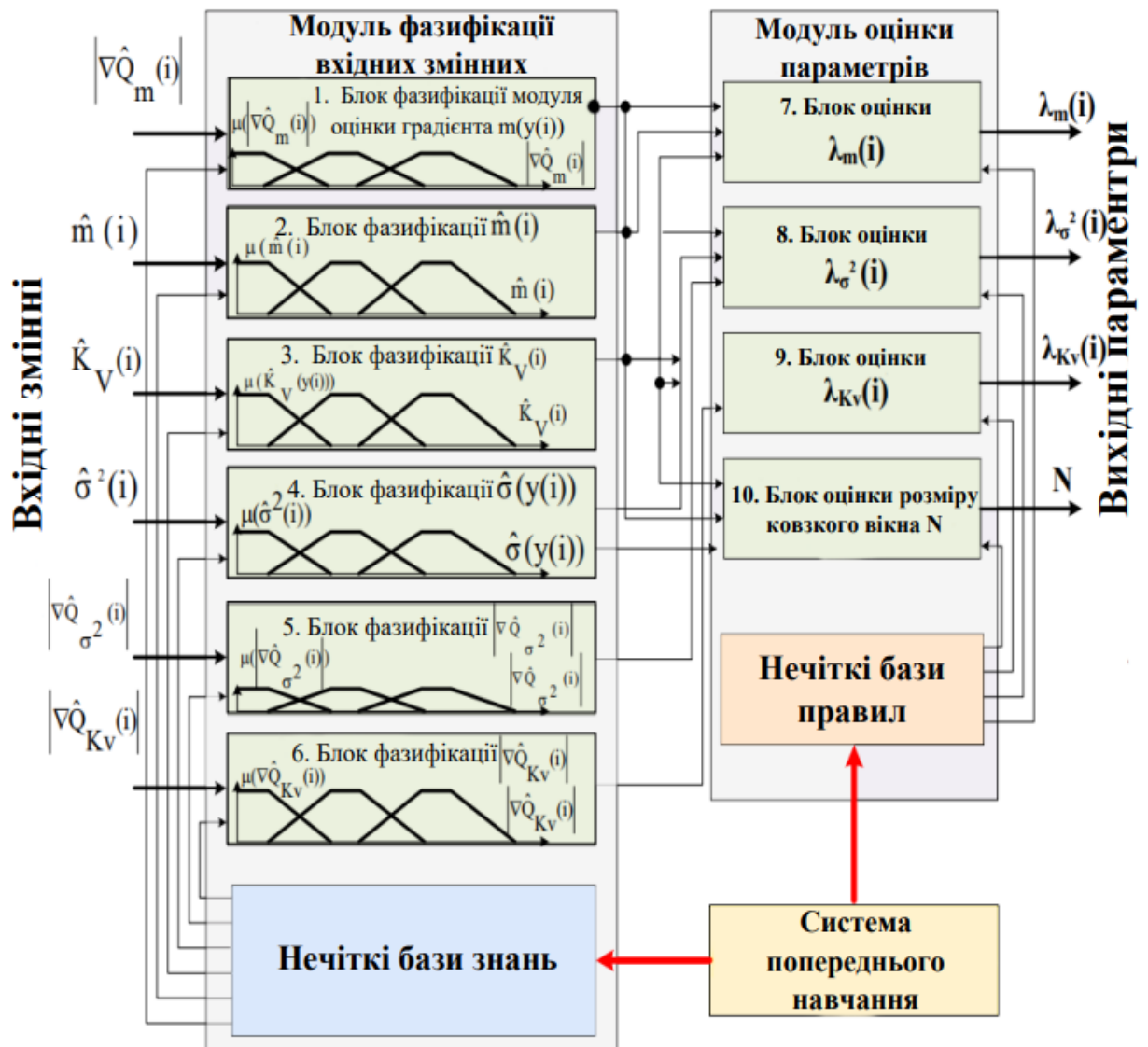


Рисунок 3.2 – Структура системи нечіткого логічного висновку

Для реалізації цих правил попередньо проводиться навчання системи нечіткого логічного висновку з експериментальними даними, отриманими на стадії її проектування [3, 4]. Особливістю даної системи нечіткого логічного висновку є те, що навчання проводиться на етапі її проектування. На етапі

експлуатації можливе невелике коригування нечітких баз правил та нечітких баз знань.

3.4 Оцінка результатів за допомогою математичного моделювання

Чисельне моделювання розробленого алгоритму оцінки параметрів інтенсивності трафіку МІС проводилося для ВП, які мають розподіл Пуассона, експоненційне та логарифмічне нормальне. Крім цього, знання порівняльних характеристик знову розроблюваних адаптивних методів та алгоритмів з методами та алгоритмами, що мають оптимальні характеристики, наприклад з оптимальним фільтром Калмана (ОФК), також представляє значний науковий інтерес.

Функції зміни оцінюваних параметрів являли собою ВП авторегресії першого порядку (АР-1) [96, 97], а також детерміновані функції. Їхній вид наведено у таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 - Види модулюючих функцій

№	Функція	Вид функції
1	Постійна функція	$u(n) = const, \forall n$
2	Ступенева функція	$u(n) = \begin{cases} u_1, & \text{якщо } \leq N_0 \\ u_2, & \text{якщо } < N_0 \end{cases}$
3	Синусоїдальна функція	$u(n)u_0 \sin = \left(\frac{2\pi}{T} n\right)$ де u_0 – амплітуда функції, що моделюється; T - період функції, що моделюється.
4	ВП АР-1	$u(n) = \rho \cdot u(n - 1) + \sigma_{u\sqrt{1-\rho^2}} \cdot \xi(n + 1)$ де ρ – коефіцієнт кореляції АР-1; $\xi(n + 1)$ - значення незалежної випадкової величини в момент часу $n + 1$, що має розподіл $N(0;1)$; $\sigma_u = \sigma_\xi / \sqrt{1 - \rho^2}$; $R_u(k) = \rho^{ k } = e^{-\alpha k }$ де $\alpha = -\ln \rho$

На рисунку 3.3 представлено тривимірний графік коефіцієнтів кроку для

процедури коригування оцінок математичного очікування ВП залежно від періоду його зміни та від значення модуля оцінки його градієнта, отриманий на етапі попереднього навчання системи нечіткого логічного висновку. При цьому значення λ_m обирається таким чином, щоб середня відносна похибка оцінки δ та її СКВ σ_δ були мінімально можливими.

Далі, після попереднього навчання алгоритму вибору значень $\{\lambda_m\}$, визначалися раціональні значення розмірів ковзких вікон N_1 та N_2 , при яких досягалися мінімальні значення середньої відносної помилки оцінки значення математичного очікування ВП δ % та СКВ середньої відносної помилки оцінки значення математичного очікування σ_δ %. Ці залежності наведено на рисунках 3.4 та 3.5.

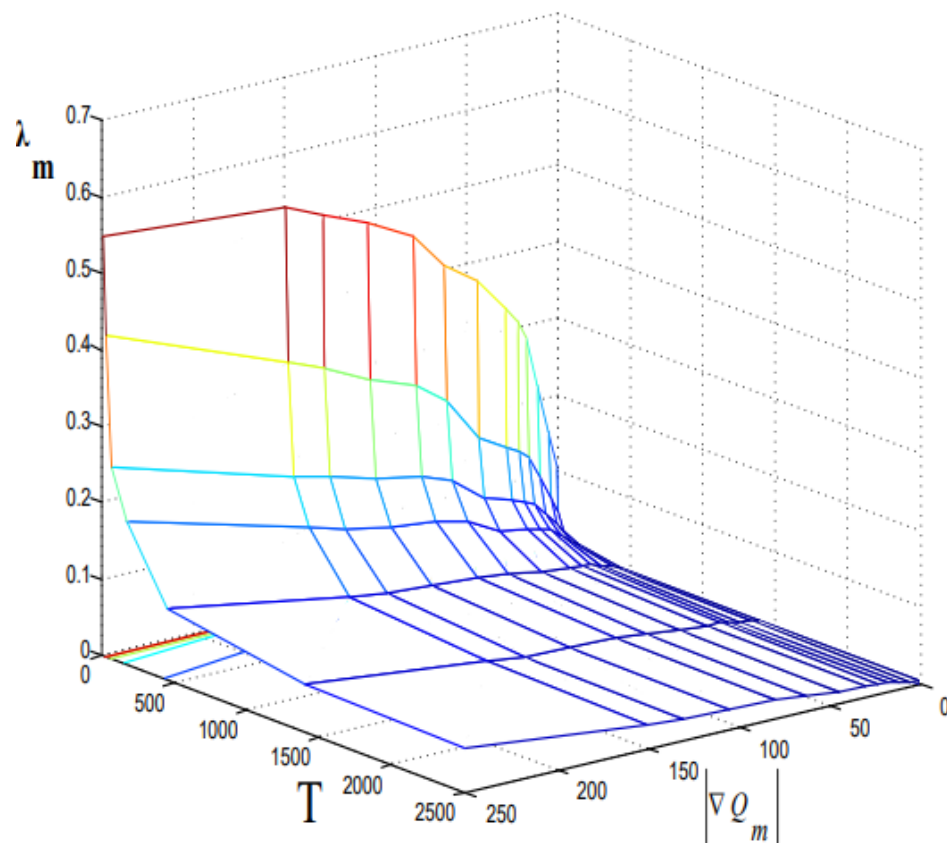


Рисунок 3.3 – Залежність коефіцієнта кроку ПГА від періоду T зміни математичного очікування та від значення $|\nabla Q_m|$, за якого досягається мінімальне значення середньої відносної помилки оцінювання поточного значення математичного очікування ВП δ %

Середнє значення процесу становило приблизно 312 Мбіт/с, максимальне значення процесу - 831 Мбіт/с, мінімальне значення процесу - 110 Мбіт/с.

Час зміни значення математичного очікування ВП від мінімального до максимального значення становив близько 300 мілісекунд. Математичне очікування ВП моделювалося процесом AP-1.

Аналіз отриманих залежностей показав, що раціональні значення N_1 і N_2 склали $N_1 \in [30 - 50]$ і $N_2 \in [25 - 45]$ відліків.

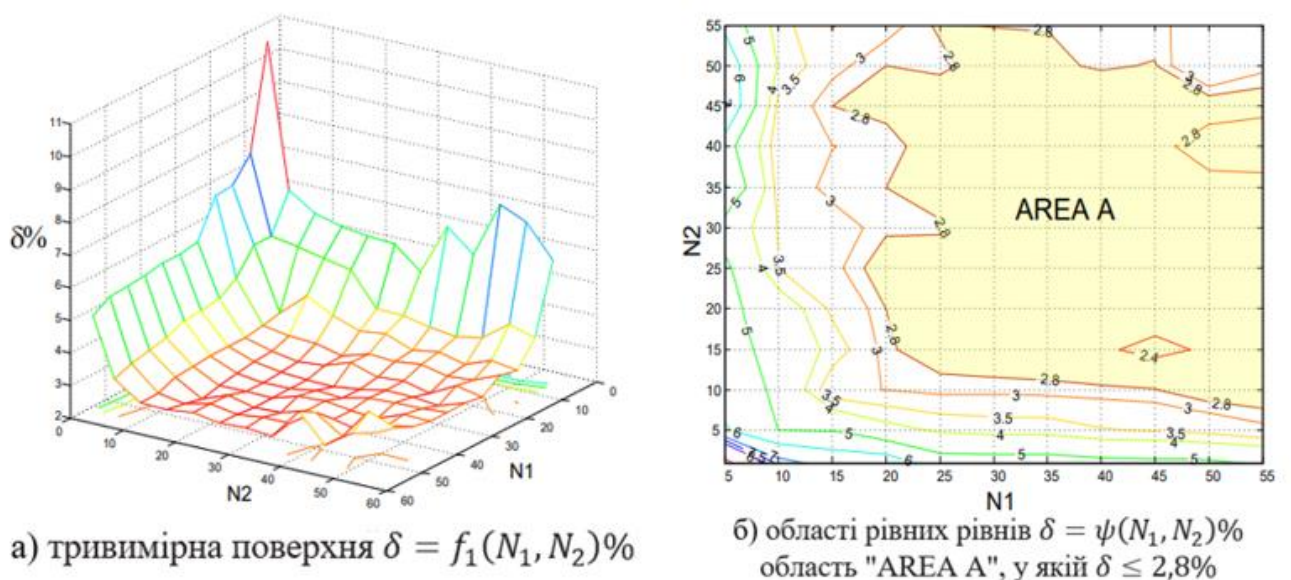
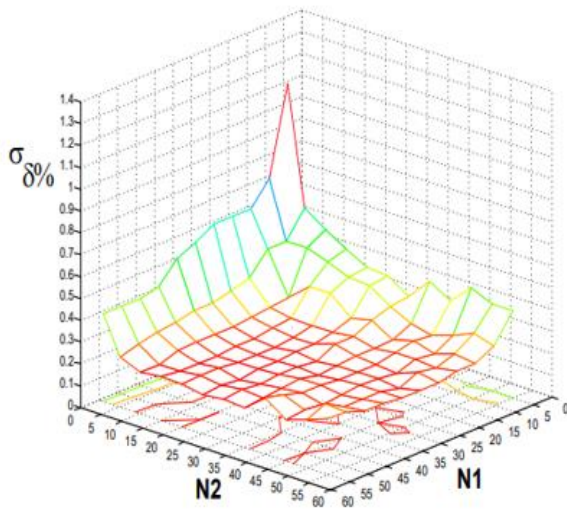
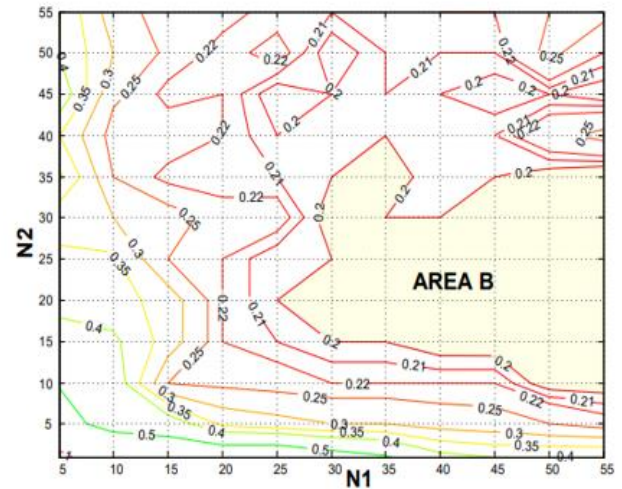


Рисунок 3.4. Залежність середньої відносної похибки оцінки математичного очікування від N_1 і N_2

При цьому значення δ не перевищує перевищувало 3%, а значення σ_δ не перевищувало 0,2%. Подальше збільшення розмірів ковзних вікон призводило до збільшення цих значень, оскільки відбувалося зайве згладжування параметрів ВП.



а) тривимірна поверхня $\delta = f_2(N_1, N_2)\%$



б) області рівних рівнів $\delta = \psi_2(N_1, N_2)\%$
Область "AREA A", у якій $\delta \leq 0,2\%$

Рисунок 3.5. Залежність значення СКВ середньої відносної похибки оцінки математичного очікування від N_1 і N_2

На рисунках 3.6 та 3.7 представлені результати перевірки за допомогою критерію χ^2 гіпотези про нормалізацію ВП після застосування процедури (3.22) при кінцевих значеннях розміру ковзкого вікна N_1 для логарифмічно нормального та експоненційного розподілів ВП [1, 2, 6]. На рисунках 3.6. а) та 3.7. а) наведені графіки значень відліків ВП, але в рисунках 3.6. б) та 3.7. б) наведено гістограми розподілів їх значень.

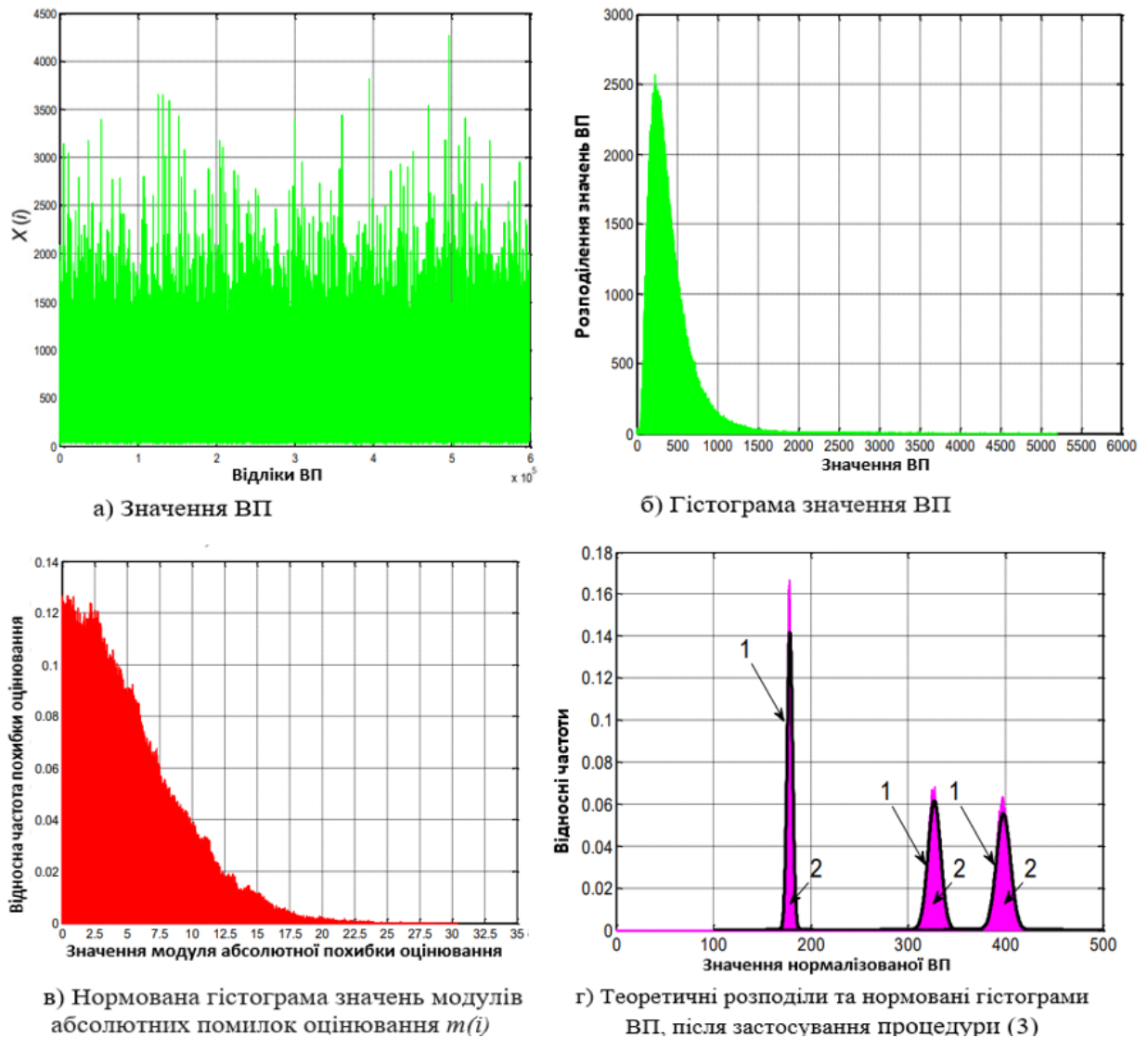
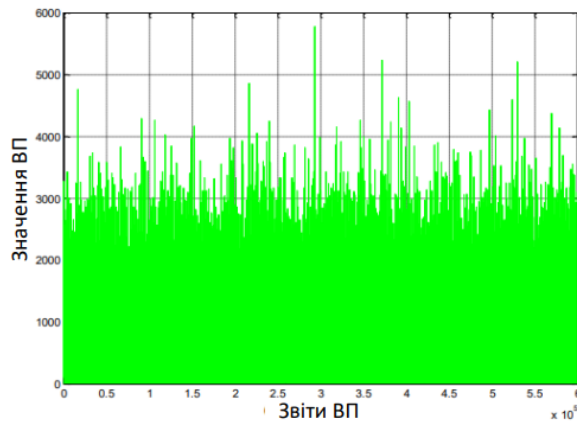
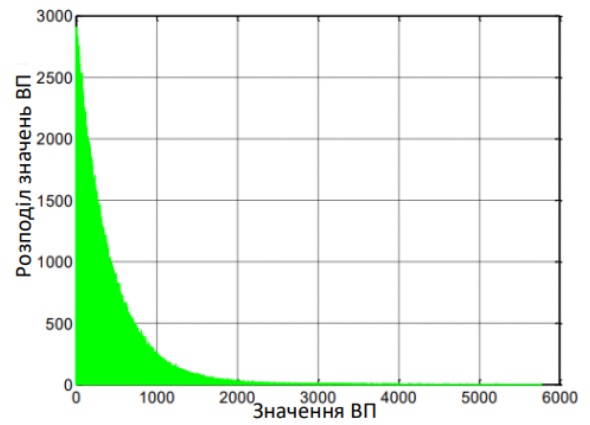


Рисунок 3.6 – Результати перевірки гіпотези про нормалізацію ВП після процедури (3.22) за критерієм χ^2

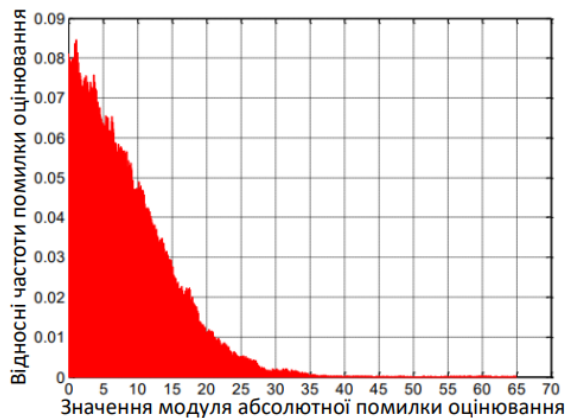
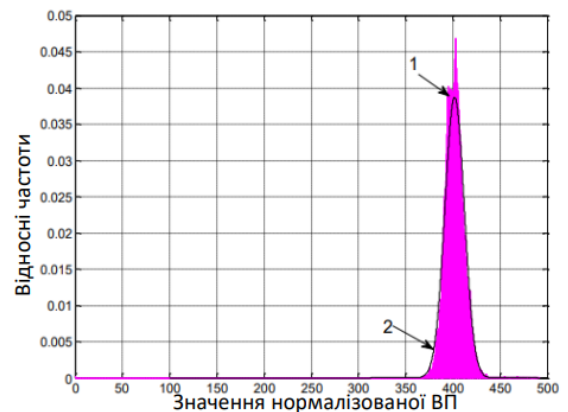
Рисунки 3.6 в) та 3.7 в) ілюструють нормовану гістограму розподілу значень модулів абсолютних помилок оцінки $m(i)$. На графіках рисунків 3.6 г) та 3.7 г) представлені нормовані гістограми ВП, отриманої після застосування процедури (3.22). На цьому рисунку цифрою 1 відзначені графіки теоретичної нормальної щільності розподілу значень $\hat{m}(i)$, параметрами яких є оцінки математичного очікування та дисперсії ВП, отриманої після застосування процедури (3.22), а цифрою 2 позначені нормовані гістограми цих розподілів для ВП з різними значеннями параметрів.



а) Значення ВП



б) Гістограма значень ВП

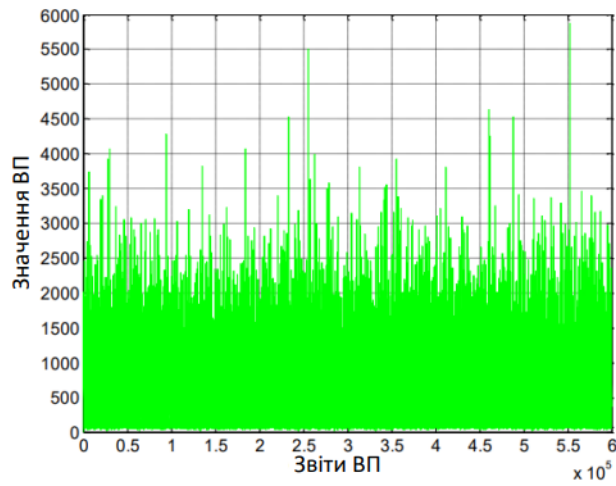
в) Нормальна гістограма значень модулів абсолютних помилок оцінювання $m(i)$ 

в) Теоретичні розподіли танормовані гістограми ВП, після застосування процедури (3.22)

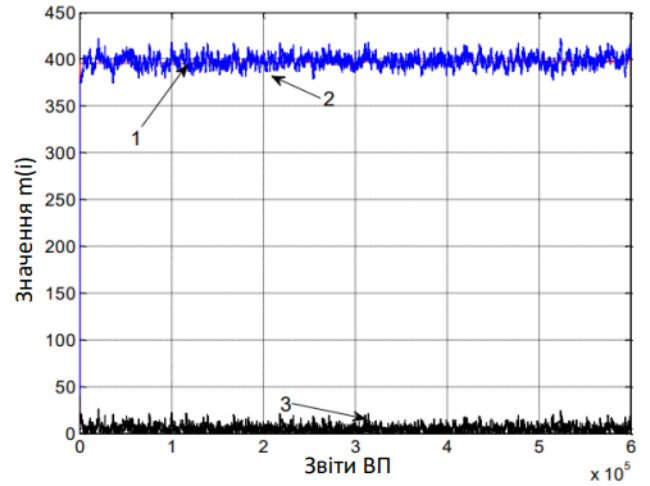
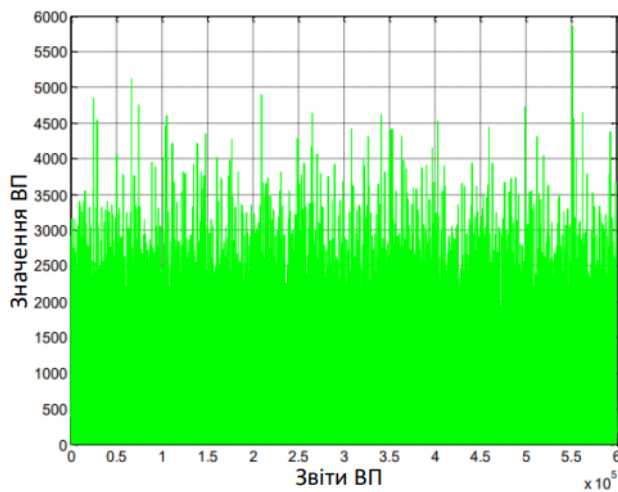
Рисунок 3.7 – Результати перевірки гіпотези про нормалізацію ВП після процедури (3.22) за критерієм χ^2

Значення рівня значимості критерію χ^2 гіпотези про нормалізацію ВП склало менше $\alpha = 0,01$. Аналогічні результати були отримані для ВП з розподілом Пуассона.

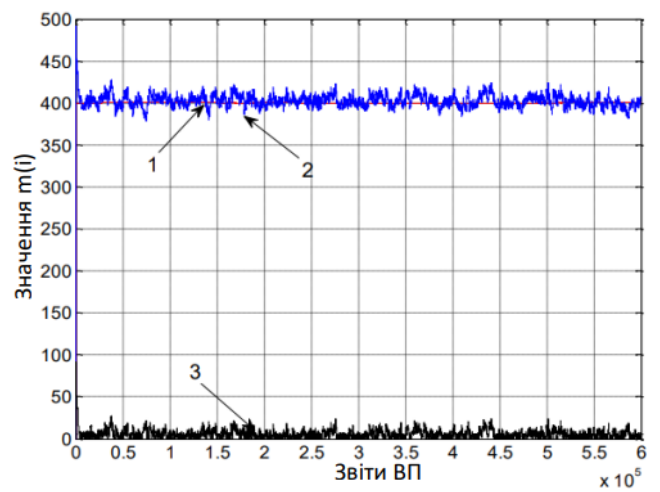
Приклади оцінок математичного очікування ВП з логарифмічно нормальним, експоненційним та пуасонівським розподілами представлені на рисунках 3.8 – 3.10. На рисунках 3.8 – 3.10 а) представлені самі ВП, а на 3.8 – 3.10 б) результати оцінок їх математичного очікування.

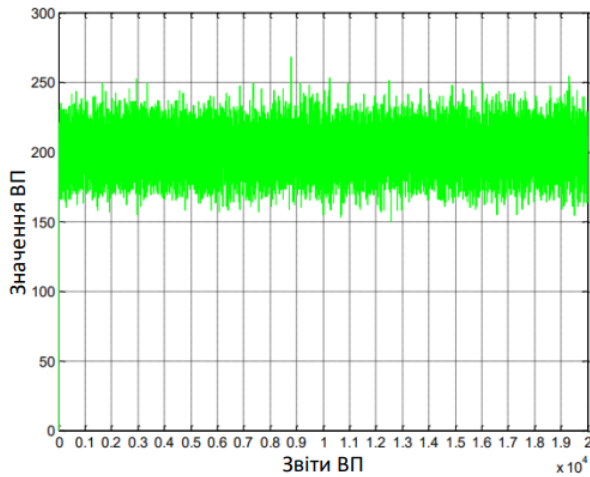


а) Значення ВП

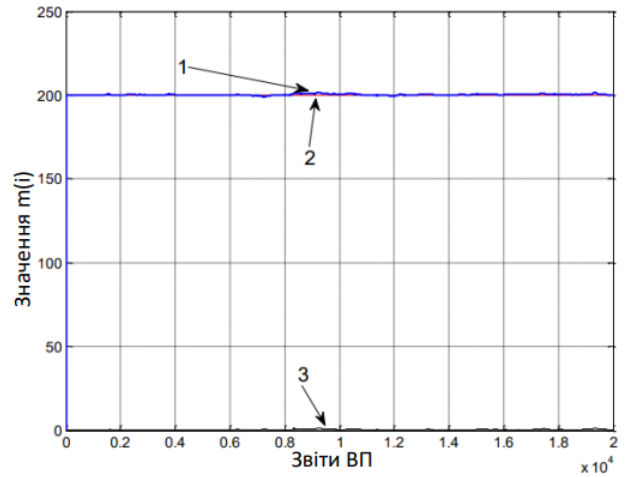
б) Оцінка значення $m(i)$; 1 – істинне значення $m(i)$; 2 оцінка $\hat{m}(i)$; 3 – модуль абсолютної помилки оцінюванняРисунок 3.8 – Логарифмічно нормальне розподіл ($\delta \leq 1.93 \%$)

а) Значення ВП

б) Оцінка значення $m(i)$; 1 – істинне значення $m(i)$; 2 оцінка $\hat{m}(i)$; 3 – модуль абсолютної помилки оцінюванняРисунок 3.9 – Експоненційний розподіл ($\delta \leq 2.24 \%$)



а) Значення ВП

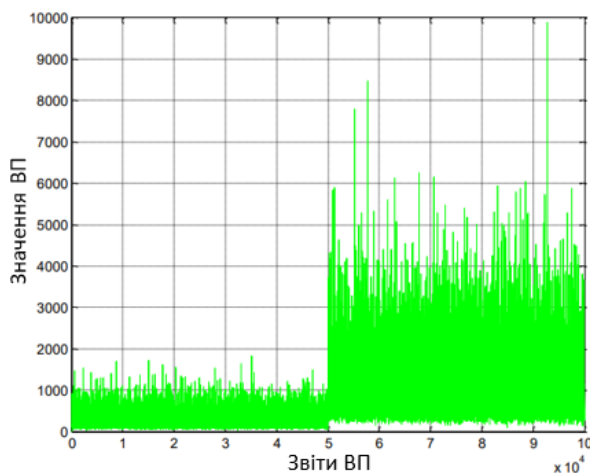


б) Оцінка значення $m(i)$; 1 – істинне значення $m(i)$; 2 оцінка $\hat{m}(i)$; 3 – модуль абсолютної помилки оцінювання

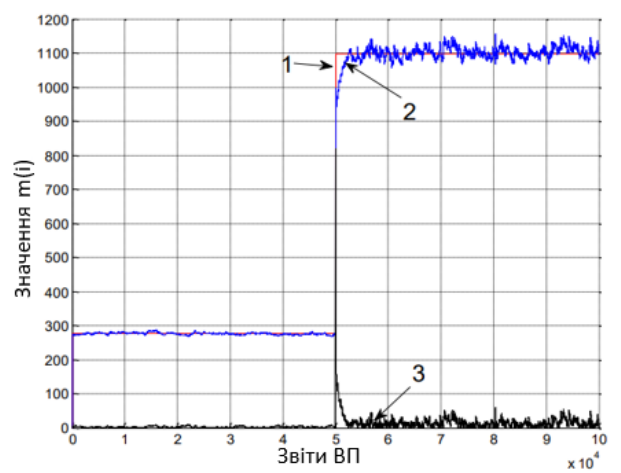
Рисунок 3.10 – Розподіл Пуассона ($\delta \leq 0.27 \%$)

У всіх випадках середня відносна помилка оцінювання не перевищує значення $\delta \leq 2.24\%$.

Приклади оцінок математичного очікування ВП для ступінчастої модулюючої функції наведено на рисунках 3.11 – 3.13.

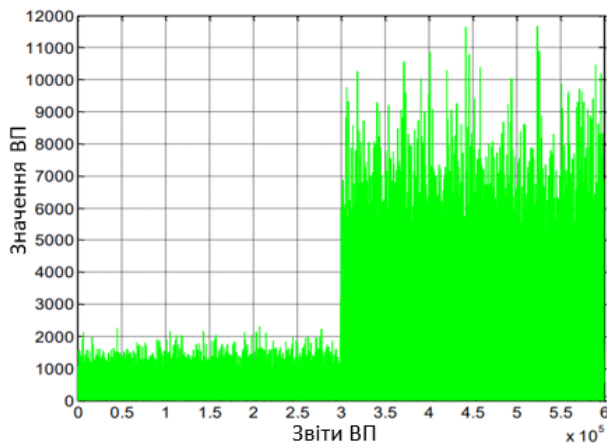


а) Значення ВП

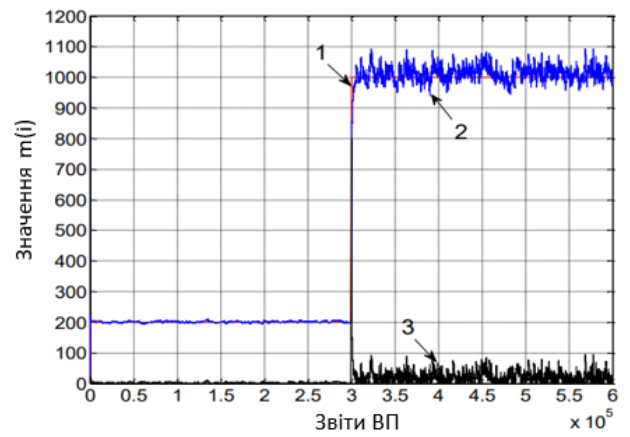
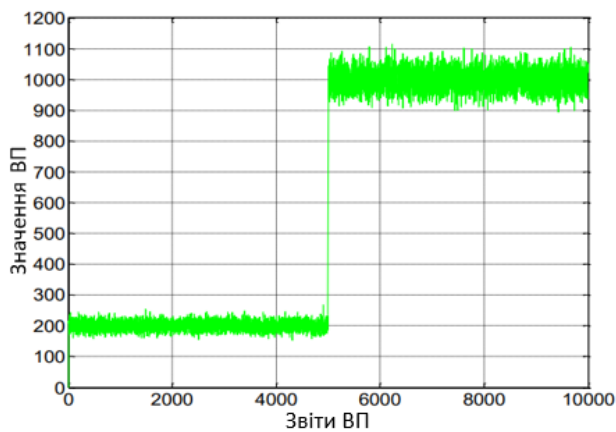


б) Оцінка значення $m(i)$; 1 – істинне значення $m(i)$; 2 оцінка $\hat{m}(i)$; 3 – модуль абсолютної помилки оцінювання

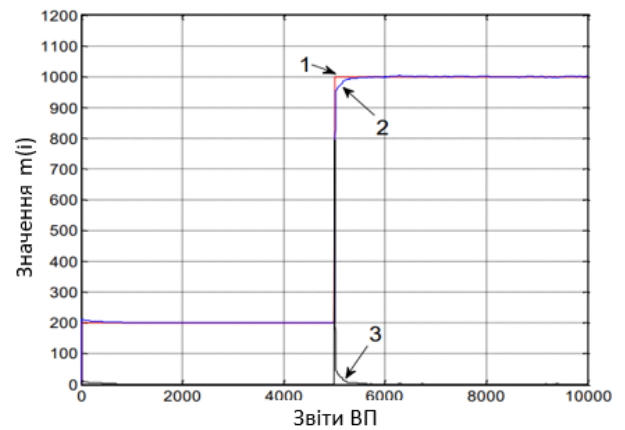
Рисунок 3.11 – Логарифмічно нормальне розподіл ($\delta \leq 1.29 \%$)



а) Значення ВП

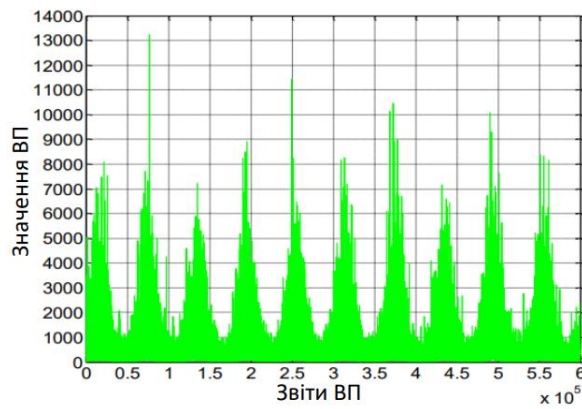
б) Оцінка значення $m(i)$; 1 – істинне значення $m(i)$; 2 оцінка $\hat{m}(i)$; 3 – модуль абсолютної помилки оцінюванняРисунок 3.12 – Експоненційний розподіл ($\delta \leq 1.61\%$)

а) Значення ВП

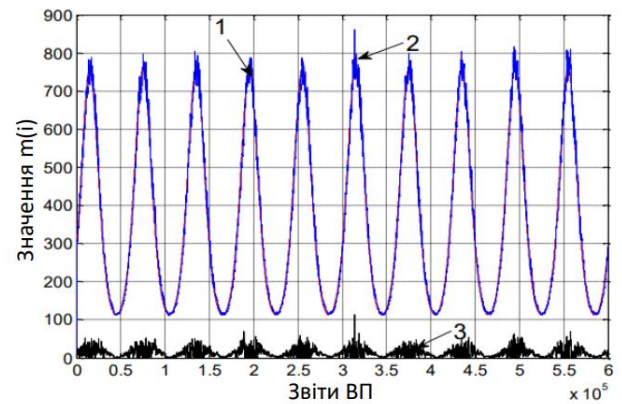
б) Оцінка значення $m(i)$; 1 – істинне значення $m(i)$; 2 оцінка $\hat{m}(i)$; 3 – модуль абсолютної помилки оцінюванняРисунок 3.13 – Розподіл Пуассона ($\delta \leq 0.58\%$)

Аналіз результатів даного чисельного експерименту показав високі динамічні характеристики запропонованого у роботі алгоритму. Швидкість збіжності алгоритму склала кілька десятків відліків за високої точності оцінки математичного очікування .

На рисунках 3.14 – 3.16 представлені результати оцінки математичного очікування ВП для періодичної модулюючої функції.

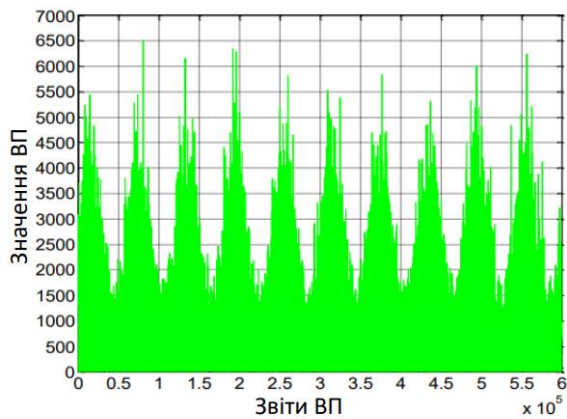


а) Значення ВП

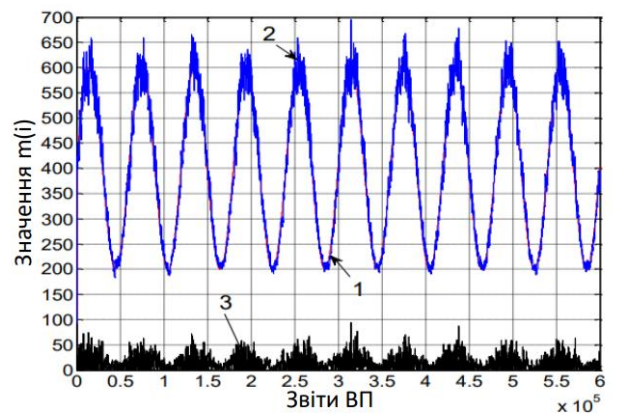


б) Оцінка значення $m(i)$; 1 – істинне значення $m(i)$; 2 оцінка $\hat{m}(i)$; 3 – модуль абсолютної помилки оцінювання

Рисунок 3.14 – Логарифмічно нормальне розподіл ($T = 6 * 10^4$; $\delta \leq 4.04 \%$)

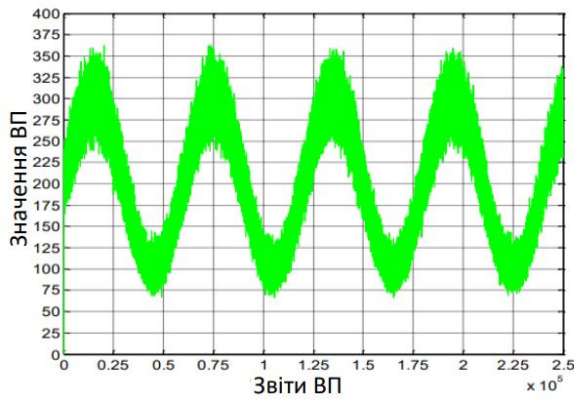


а) Значення ВП

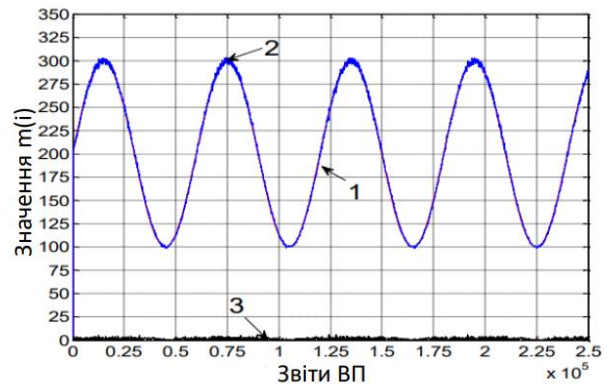


б) Оцінка значення $m(i)$; 1 – істинне значення $m(i)$; 2 оцінка $\hat{m}(i)$; 3 – модуль абсолютної помилки оцінювання

Рисунок 3.15 – Експоненційний розподіл ($T = 6 * 10^4$; $\delta \leq 3.35 \%$)

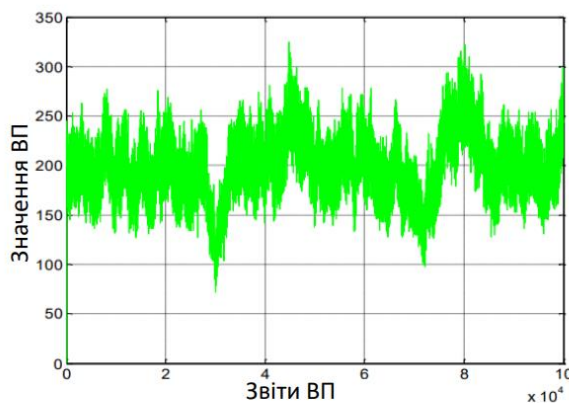


а) Значення ВП

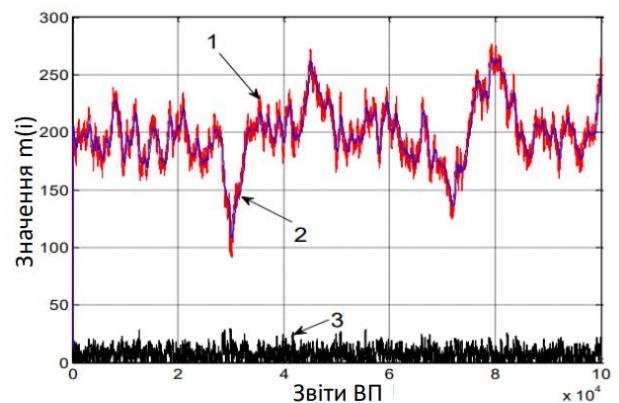
б) Оцінка значення $m(i)$; 1 – істинне значення $m(i)$; 2 оцінка $\hat{m}(i)$; 3 – модуль абсолютної помилки оцінюванняРисунок 3.16 – Розподіл Пуассона ($T = 6 * 10^4$; $\delta \leq 0.72 \%$)

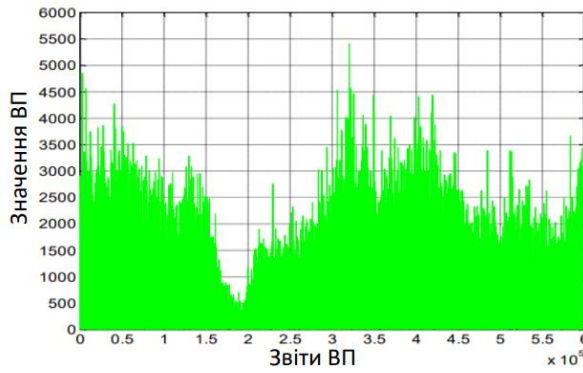
Даний чисельний експеримент також підтвердив високі динамічні та точнісні властивості розробленого адаптивного алгоритму оцінки параметрів ВП. Максимальне значення середньої відносної похибки отримане для ВП з логарифмічно нормальним розподілом $\delta \leq 4.04 \%$, що можна вважати цілком прийнятним результатом.

Приклади оцінки математичного очікування ВП для модулюючої функції АР – 1 наведено на рисунках 3.17 - 3.19.

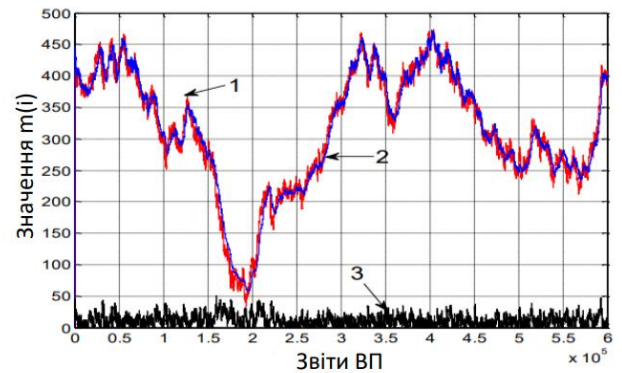


а) Значення ВП

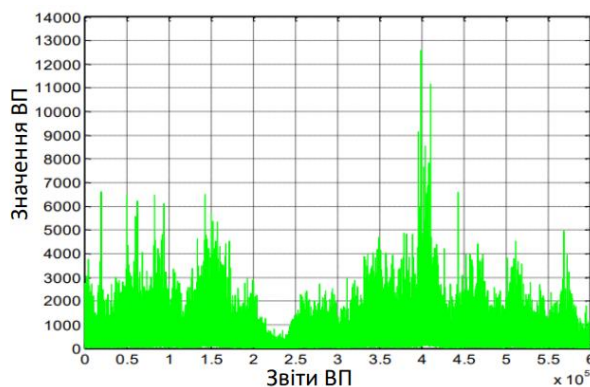
б) Оцінка значення $m(i)$; 1 – істинне значення $m(i)$; 2 оцінка $\hat{m}(i)$; 3 – модуль абсолютної помилки оцінюванняРисунок 3.17. - розподіл Пуассона ($\delta \leq 3.59 \%$)



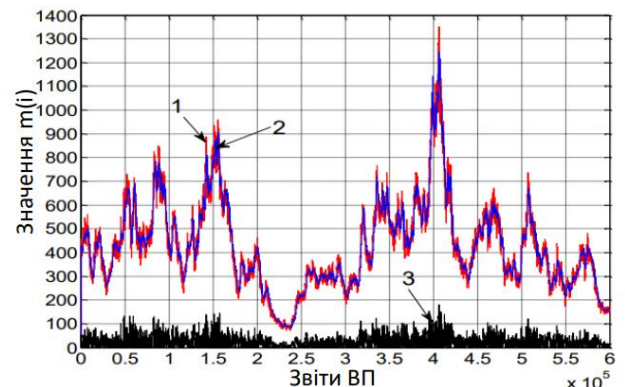
а) Значення ВП

б) Оцінка значення $m(i)$; 1 – істинне значення $m(i)$; 2 оцінка $\hat{m}(i)$; 3 – модуль абсолютної помилки оцінюванняРисунок 3.18. - експоненційний розподіл ($\delta \leq 4.64\%$)

Максимальне значення середньої відносної похибки отримане для ВП з логарифмічно нормальним розподілом $\delta \leq \delta \leq 6.28\%$. При цьому значення математичного очікування ВП змінювалися у кілька разів протягом десятків мікросекунд.



а) Значення ВП

б) Оцінка значення $m(i)$; 1 – істинне значення $m(i)$; 2 оцінка $\hat{m}(i)$; 3 – модуль абсолютної помилки оцінюванняРисунок 3.19 – Логарифмічно нормальний розподіл ($\delta \leq 6.28\%$)

В якості прикладу, що демонструє високі динамічні та точнісні характеристики запропонованого алгоритму на рисунку 3.20, наведено приклад оцінки математичного очікування ВП з логарифмічно нормальним розподілом, у якому модулюючою функцією є процес АР – 1, у якому стрибком змінюється коефіцієнт кореляції.

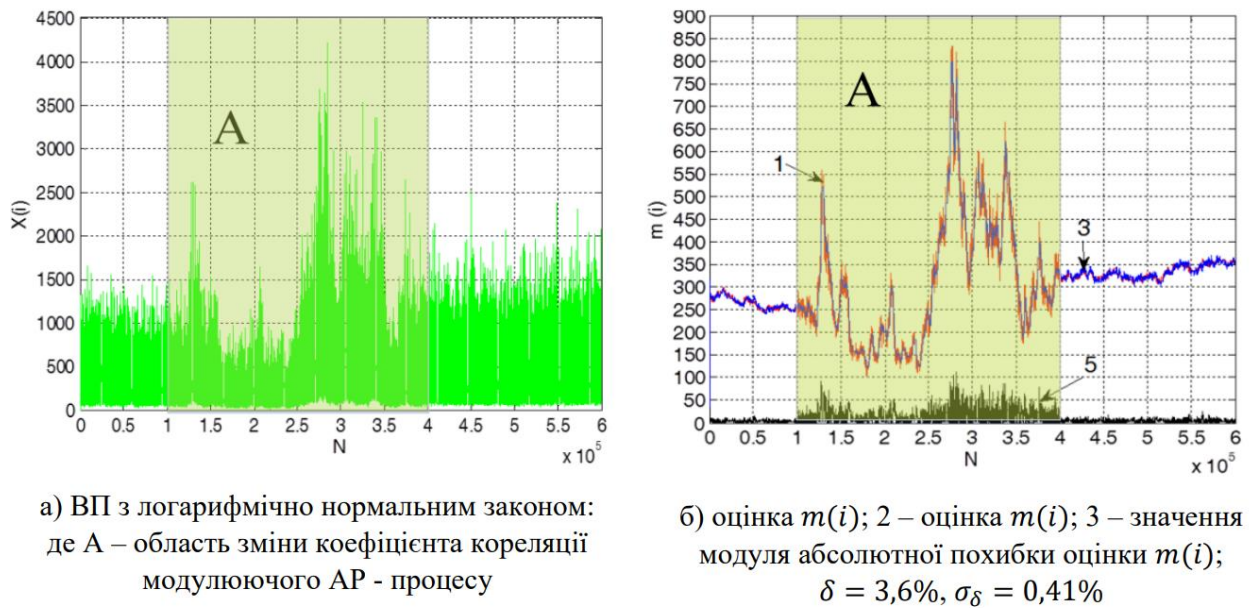


Рисунок 3.20 – Оцінка математичного очікування ВП з логарифмічно нормальним законом розподілу. Модулююча функція – ВП АР-1

Були отримані значення середньої відносної похибки оцінки математичного очікування ВП $m(i)$, що не перевершують значення $\delta = 3,6\%$ та СКВ цих похибок не перевищує значення $\sigma_\delta = 0,41\%$. Як видно з наведених графічних результатів, ВП характеризується високою динамікою зміни своїх основних параметрів. Відліки ВП генерувалися через одну мікросекунду (10^{-6} с). Значення N_1 і N_2 дорівнюють $N_1=35$ та $N_2=35$ відліків.

Аналіз результатів чисельного моделювання показав, що для стаціонарних ВП, що мають логарифмічно нормальний розподіл при зміні математичного очікування в діапазоні від 23 до 755 та дисперсії ВП, яка одночасно змінюється від 12,15 до 400, значення δ змінюється від 0,043% до 1,12%, а значення σ_δ – від 0,043% до 0,096%.

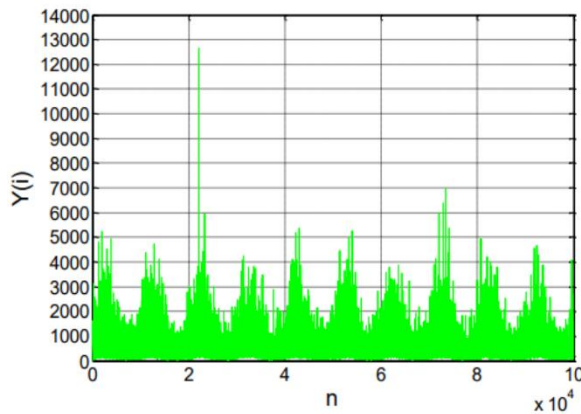
У таблиці 3.3 наведено точнісні характеристики алгоритму оцінки математичного очікування стохастичного трафіку МІС.

З таблиці випливає, що величина середньої відносної помилки оцінки математичного очікування менше 8.4% від її істинного значення.

Таблиця 3.3 – Точнісні характеристики алгоритму оцінки математичного очікування інтенсивності стохастичного трафіку.

Вид розподілу	Коефіцієнт кореляції (ρ)	Точність оцінки $m(i)$ трафіку МІС (%)	
		Існуючі алгоритми	Запропонований алгоритм
Розподіл Пуасона	0.9995	4.8	3.63
	0.999	5.22	3.8
	0.99	10.69	8.3
Логарифмічно нормальний розподіл	0.999999995	5.36	3.96
	0.99999999	5.7	5.58
	0.99999995	7.78	6.76
	0.9999999	8.3	7.13
Експоненціальний розподіл	0.99999	5.2	2.23
	0.9999	9.8	4.52
	0.999	10.56	8.1

Як приклад прикладу спільного оцінювання параметрів трафіку (3.33), на рисунку 3.21 наведено результати оцінки математичного очікування, СКВ та коефіцієнта варіації ВП з логарифмічно нормальним розподілом. В цьому експерименті середнє значення ВП склало 484 Мб/сек, період зміни математичного очікування ВП становив $T = 10$ мс. Загальний розмах амплітуди зміни математичного очікування становив, приблизно, 500 Мбіт/сек.



а) Значення ВП

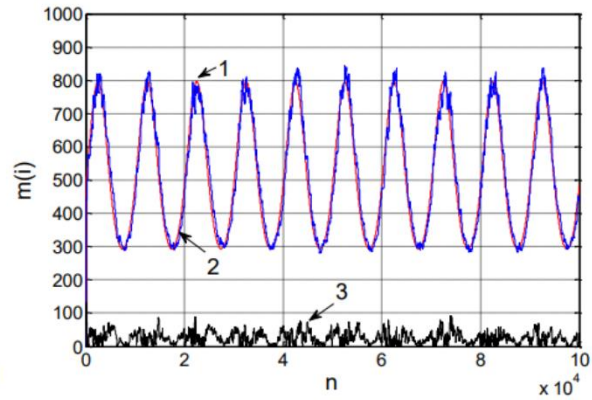
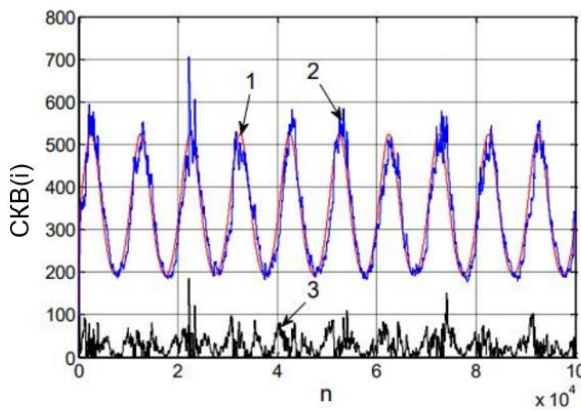
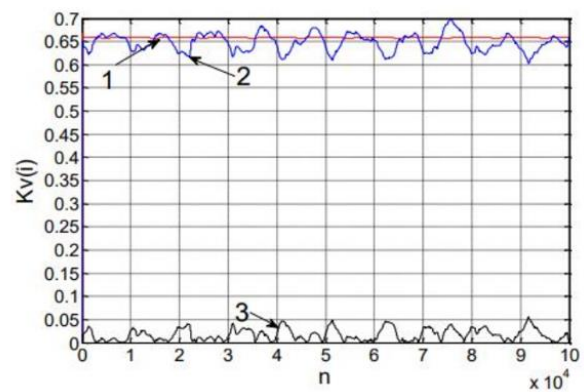
б) Оцінка значення $m_x(i)$; 1 – істинне значення $m_x(i)$; 2 оцінка $\hat{m}_x(i)$; 3 – модуль абсолютної похибки оцінювання ($\delta_{m_x} \leq 5,4\%$)в) Оцінка $\sigma_x(i)$; 1 – істинне значення $\sigma_x(i)$; 2 - оцінка $\hat{\sigma}_x(i)$; 3 – модуль абсолютної похибки оцінювання ($\delta_{\sigma_x} \leq 7,8\%$)г) Оцінка $K_v(i)$; 1 – істинне значення $K_v(i)$; 2 - оцінка $\hat{K}_v(i)$; 3 – модуль абсолютної похибки оцінювання ($\delta_{K_v} \leq 3,47\%$)

Рисунок 3.21 – Спільна оцінка параметрів інтенсивності трафіку. ВП має логарифмічно нормальне розподіл. Модулююча функція – детермінована періодична функція

Нижче наведено результати порівняльного аналізу характеристик одновимірного оптимального фільтра Калмана (ОФК) (3.12), (3.13) та розроблених адаптивних алгоритмів. В цьому чисельному експерименті модель ВП та поточних спостережень має вигляд:

$$\begin{aligned} u(n) &= \rho \cdot u(n-1) + \sigma_x \sqrt{1-\rho^2} \cdot \xi(n+1); \\ m(n) &= u(n) + m_x, \\ y(n) &= x(n) + \theta(n) \end{aligned} \quad (3.36)$$

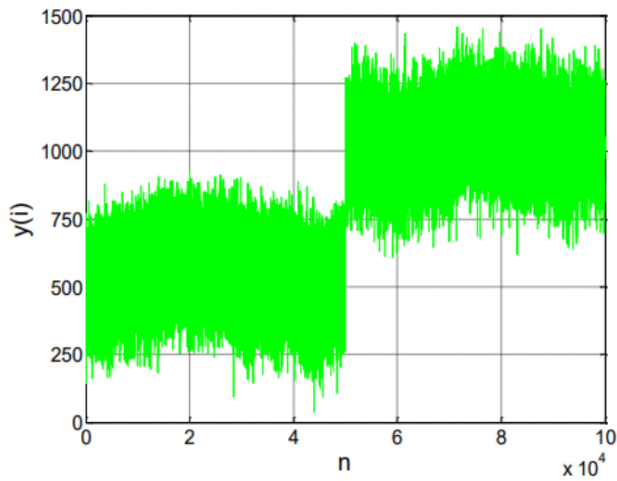
де ρ - коефіцієнт кореляції AP – 1; σ_x - середньоквадратичне відхилення (СКВ) AP – 1; $\xi(n + 1)$ - значення незалежної випадкової величини в момент часу $n + 1$, що має розподіл $N(0; 1)$; $\sigma_x = \sigma_\xi / \sqrt{1 - \rho^2}$; ρ - значення коефіцієнта кореляції ВП AP – 1; $R_x(k) = \rho^{|k|} = e^{-\alpha|k|}$, де $\alpha = -\ln\rho$; $\theta(n)$ – некорельована гауссівська ВП з нульовою середньою та постійною дисперсією σ_θ^2 ; m_x – значення постійної складової ВП. За поточними значенням спостережень $y(n)$ необхідно побудувати оцінку $\hat{m}(n)$.

В першому чисельному експерименті проводилося порівняння динамічних властивостей розробленого адаптивного алгоритму з динамічними властивостями ОФК. Критерієм було значення середньої відносної похибки оцінки значення математичного очікування ВП. На рисунку 3.22 представлені результати отримані за допомогою ОФК.

В цьому експерименті значення математичного очікування змінювалося стрибком від 500 до 1000.

Значення СКВ в експерименті рівні $\sigma_x = 100$ та $\sigma_\theta = 100$ відповідно. Перехідний процес алгоритму склав близько 100 – 130 відліків, значення середньої відносної похибки склало $\delta_{m_x} = 0.89\%$.

На рисунку 3.23 представлені результати оцінки $\hat{m}(n)$ ВП, отримані за допомогою алгоритму (3.31), (3.32).



а) Значення ВП

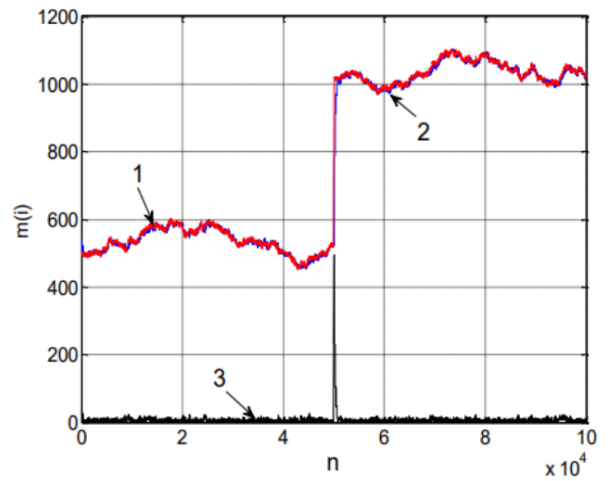
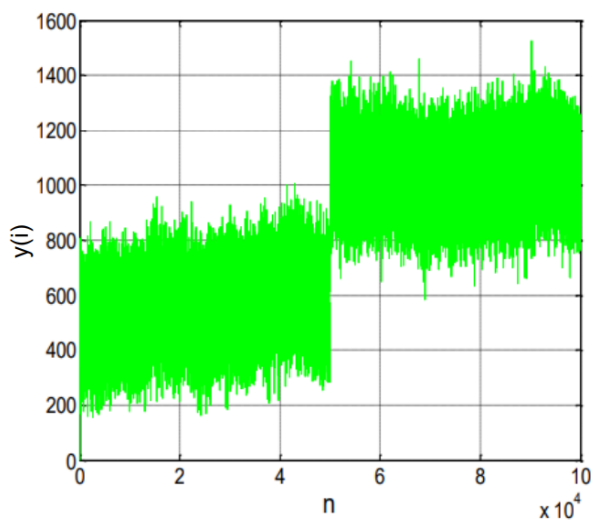
б) Оцінка значення $\hat{m}(n)$; 1 – істинне значення $t(n)$; 2 оцінка $\hat{m}(n)$; 3 – значення модуля абсолютної похибки

Рисунок 3.22 – Результати оцінки математичного очікування інтенсивності трафіку алгоритмом ОФК



а) Значення ВП

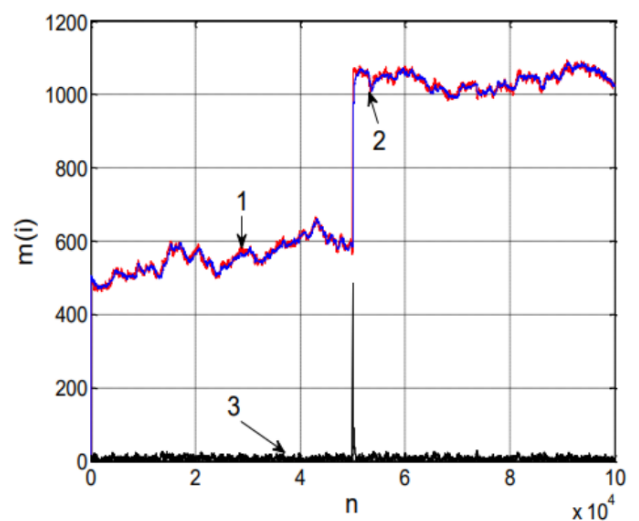
б) Оцінка $\hat{m}(n)$; 1 – істинне значення $t(n)$; 2 оцінка $\hat{m}(n)$; 3 – значення модуля абсолютної похибки

Рисунок 3.23 – Результати оцінки математичного очікування інтенсивності трафіку алгоритмом (22), (26)

Статистичні параметри моделі були аналогічні тим, які були обрані у першому чисельному експерименті. У проведеному експерименті перехідний процес алгоритму склав близько 120 - 140 відліків. Значення середньої

відносної похибки склав $\delta = 1.01\%$. Таким чином, отримане значення програшу в оцінці $\hat{m}(n)$ запропонованого алгоритму та ОФК показує його високі динамічні та точнісні характеристики.

На рисунку 3.24 представлені залежності $\delta\% = f(\sigma_x^2/\sigma_\theta^2)$ при постійному $\rho = 0.99999$ для ОФК та для алгоритму (3.31), (3.32) для різних значень постійної складової ВП m_x .

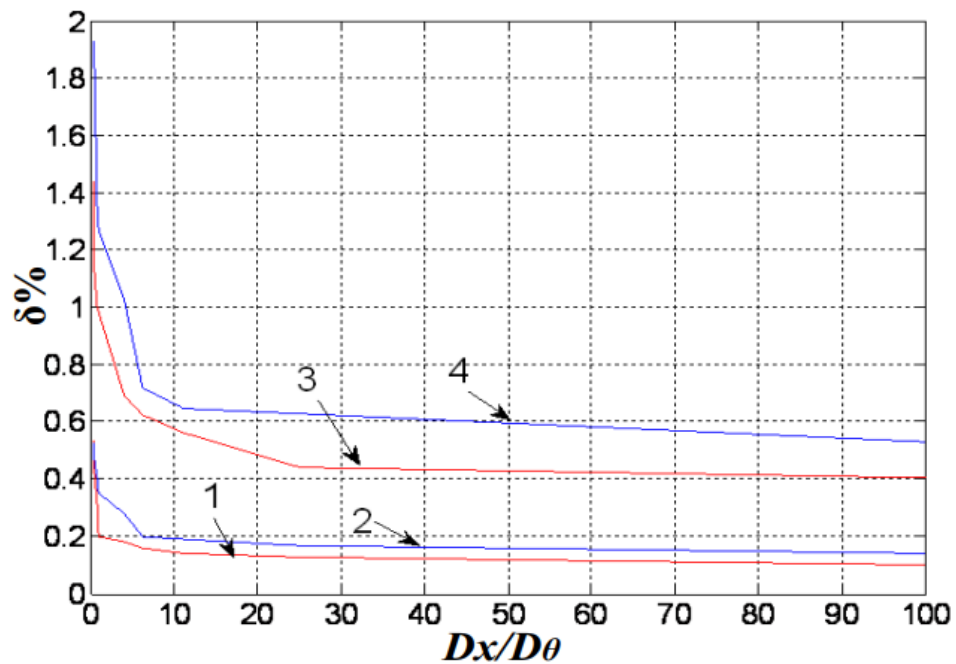


Рисунок 3.24 – Залежності $\delta\% = f(\sigma_x^2/\sigma_\theta^2)$ при постійному значенні $\rho = 0.99999$, для $m_x = 1000$ (криві 1 і 2) та $m_x = 400$ (криві 3 і 4); криві 1 та 3 – ОФК; криві 2 та 4 – адаптивний алгоритм

На цьому рисунку криві 1 та 3 відповідають оцінкам середньої відносної похибки, отриманим за допомогою ОФК, а залежності 2 та 4 – за допомогою алгоритму (3.31), (3.32).

В цьому експерименті програш значень середньої відносної похибки алгоритму (3.31), (3.32) ОФК становив трохи більше 0.2%, що є цілком прийнятним результатом для його практичного застосування.

На рисунку 3.25 представлені залежності $\delta\% = \phi(\rho)$, при різних

значеннях співвідношень $\sigma_x^2/\sigma_\theta^2$. Криві 1 та 3 відповідають значенням цього співвідношення рівному 100, а криві 2 та 4 – рівному 1.

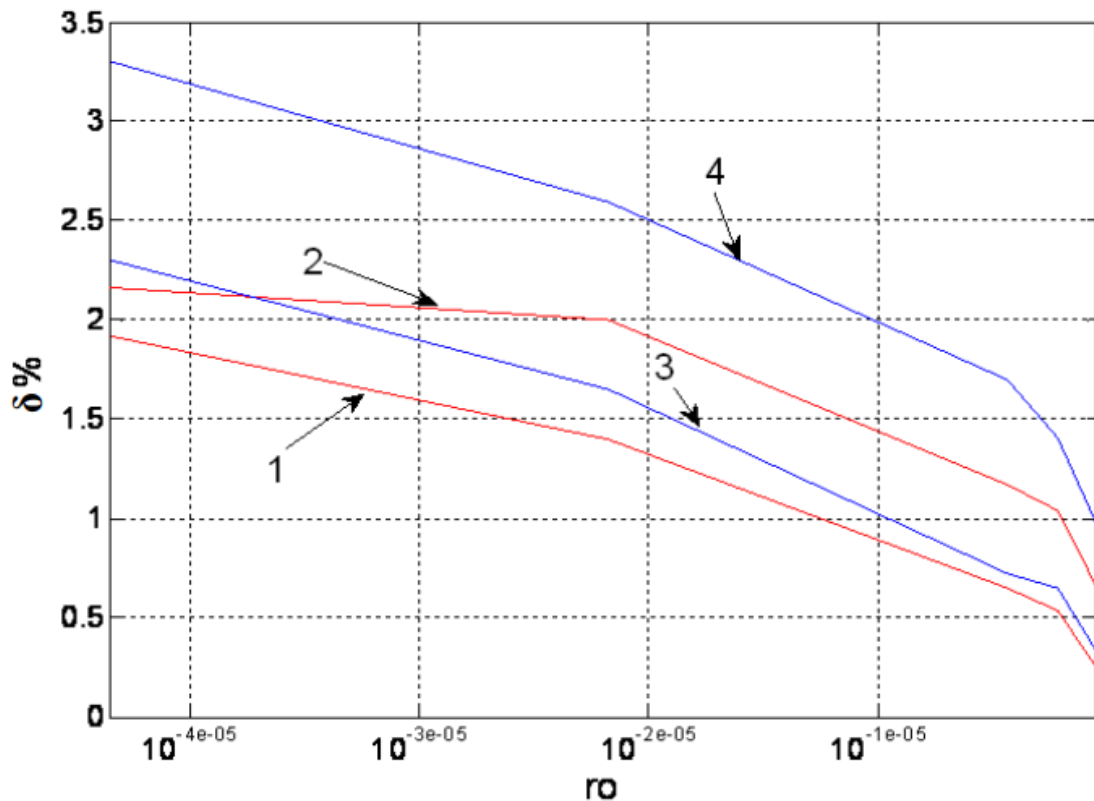


Рисунок 3.25 – Залежність $\delta\% = \phi(\rho)$; 1, 2 – ОФК; 3, 4 – алгоритм (22), (23)

В цьому експерименті програш алгоритму (3.31), (3.32) ОФК становив менше 1.83% за критерієм середньої відносної похибки оцінки.

Отримані порівняльні точнісні та динамічні характеристики розробленого алгоритму в порівнянні з ОФК дозволяє стверджувати, що його застосування забезпечує отримання оцінок параметрів трафіку в МІС з точністю, достатньою для прийняття об'єктивних рішень з управління якістю послуг зв'язку.

А застосування ЛФК і РФК вимагає значних додаткових зусиль в апріорній ідентифікації параметрів трафіку та побудову його адекватної математичної моделі, що в умовах високої динаміки зміни цих характеристик

не завжди може бути реалізовано з необхідною якістю.

3.5 Використання алгоритмів оцінювання параметрів трафіку в МІС

Основними завданнями управління якістю послуг зв'язку, в яких доцільно застосування адаптивного алгоритму оперативної оцінки параметрів трафіку (3.31), (3.32), можуть бути моніторинг та оцінка міжкінцевих затримок під час передачі трафіку, результати яких використовуються для управління процедурами маршрутизації моніторингу втрат мережевих пакетів, а також завдання оперативного виявлення аномальної поведінки трафіку в мережі, рішення яких застосовуються для управління мережевою безпекою [2, 3, 4, 6].

Коротко розглянемо варіанти застосування алгоритмів (3.31), (3.32) під час вирішення кожною з цих завдань.

Відомо кілька варіантів апроксимації залежності середньої часової затримки передачі від параметрів потоку та характеристик обслуговуючого приладу для систем масового обслуговування (СМО) класу $G/G/1$ [37, 87, 88]. Одним з найчастіше застосовуваних функціональних уявлень є залежність, отримана в роботах [87, 88], в яких верхня границя сумарного часу затримки обслуговування заявки та її передачі до лінії зв'язку має вигляд:

$$t_{k,l} \leq \frac{\rho_{k,l}}{\lambda_{k,l}} + \frac{K_{a k,l}^2 + \rho_{k,l}^2 \cdot K_{b k,l}^2}{2 \cdot \lambda_{k,l} (1 - \rho_{k,l})}, \quad (3.37)$$

де $t_{k,l}$ – час затримки обслуговування та її передачі до лінії зв'язку; $\lambda_{k,l}$ – значення інтенсивності вхідного потоку; $\rho_{k,l}$ – коефіцієнт використання лінії зв'язку; $K_{a k,l}^2$ – квадрат коефіцієнта варіації вхідного потоку; $K_{b k,l}^2$ – квадрат коефіцієнта варіації процесу обслуговування заявки у лінії (k, l) . У виразі (3.37) усі вхідні величини можуть бути оцінені за допомогою ПГА (3.31), (3.32).

Ймовірність втрати пакетів P_{loss} для МІС з обмеженим буфером

визначається для СМО типу $G/G/1/N$, яка є найбільш загальною моделлю, у відповідність до виразом [13, 18, 36, 37]:

$$P_{loss} \approx \frac{1 - \rho}{\frac{2}{1 - \rho^{K_a^2 + K_b^2}} N + 1} \rho^{\frac{2}{K_a^2 + K_b^2} N} \quad (3.38)$$

де ρ - коефіцієнт використання лінії зв'язку, N – ємність буфера, K_a^2 – значення квадрата коефіцієнта варіації вхідного трафіку, K_b^2 – значення квадрата коефіцієнта варіації процесу обробки трафіку на вузлі комутації. Ці значення, а також поточні значення інтенсивностей трафіку, пропонується оцінювати за допомогою ПГА (3.31). Для СМО типу $M/M/1/N$ вираз (3.38) спрощується і може мати наступний вигляд [3,5]:

$$P_{loss} \approx \frac{1 - \rho}{1 - \rho^{N+1}} \rho^N \text{ або при } \rho^N \ll 1, P_{loss} \approx \rho^N \quad (3.39)$$

Для мережі передачі даних, в якій M – вузлів комутації пакетів, загальна ймовірність втрати пакетів обчислюється у відповідність до правила [3]:

$$P_{loss \text{ заг}} \approx 1 - \prod_{i=1}^M (1 - P_{loss \ i}) \quad (3.40)$$

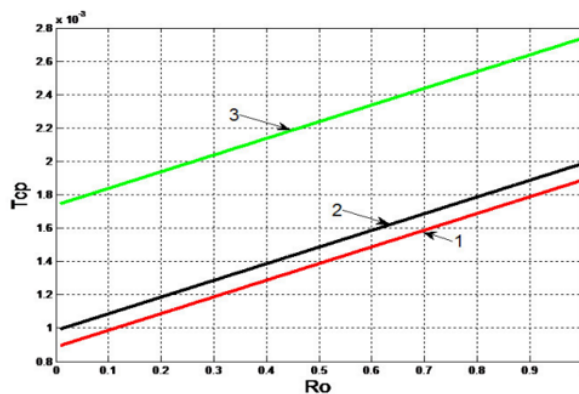
На рисунку 3.26 наведено залежності сумарного часу затримки обслуговування заявки та її передачі до лінії зв'язку відповідно до (3.37).

Результати чисельного експерименту показали, що оцінка середнього часу затримки обслуговування заявки та її передачі до лінії зв'язку здійснюється з середньою відносною похибкою та має значення менше ніж 10%. Слід відзначити, що алгоритм (3.31) дозволяє оцінювати поточний прогноз часу затримки обслуговування заявки, що має важливе значення для

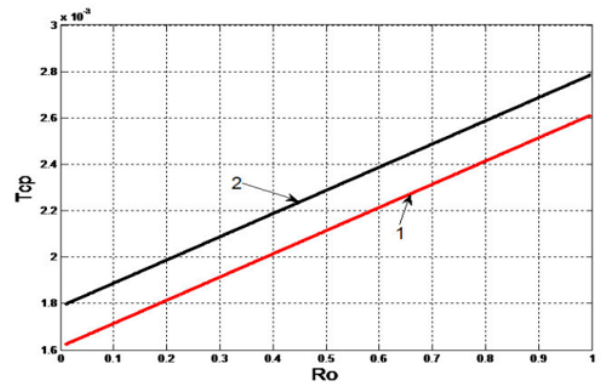
реалізації механізмів оперативного управління показниками QoS у МІС.

Залежності ймовірностей втрати пакетів від значень розмірів буферів МЕ $P_{loss} = \vartheta(N)$, при заданих значеннях ρ , показано на рисунку 3.27.

З наведених залежностей випливає, що за наявної поточної оцінки параметрів трафіку, можна оцінювати у вигляді поточного прогнозу величини розмірів буферів МЕ для забезпечення необхідних показників QoS. Середня відносна помилка прогнозу величини буфера, при високих значеннях коефіцієнта використання каналу ρ , не перевищує 6 - 8%, що є достатнім значенням [6].

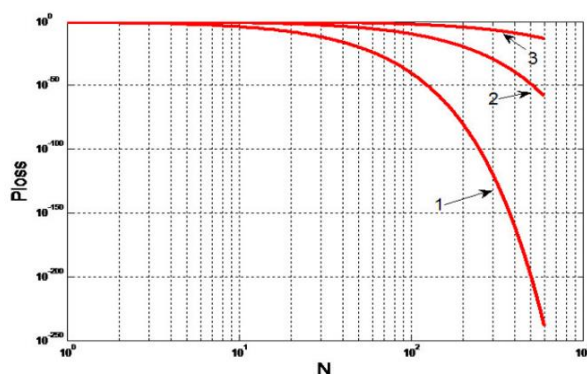


а) 1- пуассонівський потік при відомих характеристиках; 2- пуассонівський потік, відносна похибка оцінки Ka_k, l 5%; 3 – логнормальний потік з $Ka_k, l=1,4$

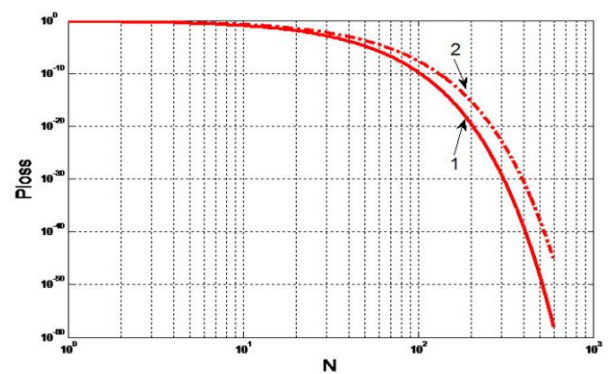


б) 1 - логнормальний потік з $Ka_k, l=1,4$; 2- логнормальний потік з $Ka_k, l=1,4$, відносна похибка оцінки Ka_k, l 5%;

Рисунок 3.26 Середній час затримки обробки трафіку на МЕ



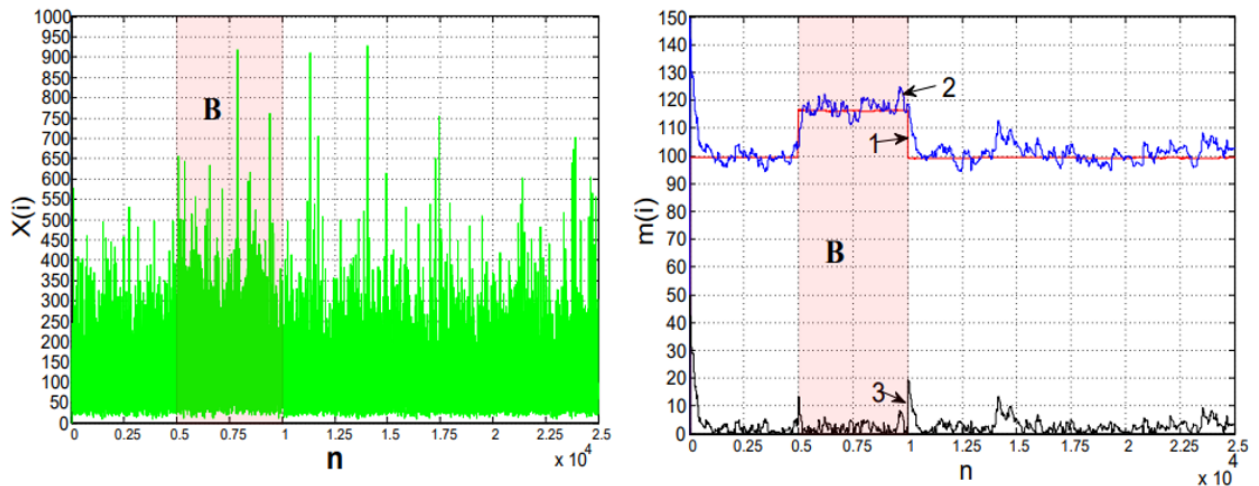
а) 1 – $\rho = 0,4$; 2 – $\rho = 0,8$; 3 – $\rho = 0,9$



б) 1 – $\rho = 0,8$; 2 – $\rho = 0,85$

Рисунок 3.27 – Залежності ймовірностей втрати пакетів від значень розмірів буферів МЕ

Приклад результатів чисельного моделювання алгоритму виявлення аномалій математичного очікування ВП наведено рисунку 3.28 [116, 117]. На рисунку 3.27 а) наведено реалізацію ВП.



а) ВП з логарифмічно-нормальним законом розподілу

б) Оцінка значень $m(i)$; 1 – модельне значення $m(i)$; 2 оцінка значень $m(i)$; 3 – модуль абсолютної похибки оцінювання $m(i)$; В – область аномального поведіння трафіку

Рисунок 3.28 – Приклад алгоритму виявлень аномалій інтенсивності трафіку ВП з логарифмічно нормальним законом розподілу

Математичне очікування ВП $m_x(i)$ дорівнює приблизно 100 Мбіт/с, середньоквадратичне відхилення ВП $\sigma_x(i)$ становило приблизно 66 Мбіт/с. Модулююча функція - AP-1 з високим коефіцієнтом кореляції. На всіх рисунках 3.27 а), б) область В відповідає аномальній поведінці трафіку . На рисунку 3.28 б) наведено результат оцінки $m_x(i)$. Значення δ дорівнює 2.94%.

Підвищення середнього значення ВП за наявності аномалії дорівнює близько 17%. Проведені дослідження показали, що середня затримка процедури автоматичної реєстрації аномалії склала від 80 до 130 відліків або 80 - 130 мкс, що в більшості випадків достатньо для оперативного реагування на появу аномальних проявів поведінки трафіку в МІС.

3.6 Висновки до третього розділу

В третьому розділі отримані наступні нові науково - технічні результати:

Проведено аналіз основних методів оцінки характеристик та параметрів трафіку МІС. Виконано аналіз основних рекурентних методів та алгоритмів отримання цих оцінок, що функціонують у режимі часу, близькому до реального. До подібних методів та алгоритмів відносяться оптимальний фільтр Калмана, лінеаризований та розширений фільтри Калмана.

Сформульовано завдання отримання оцінок параметрів мережевого трафіку в режимі близькому до реального часу для нелінійної та нестационарної його моделі.

На основі концепції умовної нелінійної Парето – оптимальної фільтрації виконано синтез адаптивного алгоритму оцінки параметрів трафіку МІС, що працює в режимі реального часу та відносяться до класу псевдоградієнтних адаптивних алгоритмів. Вибір параметрів адаптації реалізується на основі процедури попереднього навчання, а за їх функціонування адаптація їх параметрів виробляється на основі методу нечіткого логічного висновку. Отримана точність запропонованого алгоритму у 1.4 – 1.8 разу вище в порівнянні з іншими подібними методами і, в середньому, не перевищує найгірших випадках 8.3%.

За критерієм χ^2 було визначено конкретні значення розмірів ковзких вікон, при якому відбувається нормалізація ВП. Це, на відміну від інших методів та алгоритмів, забезпечує інваріантність структури алгоритму оцінки параметрів трафіку від його імовірнісних властивостей.

Розроблено процедуру регулювання параметрів алгоритму оцінки характеристик трафіку на основі методів нечіткого логічного висновку Такагі - Сугено .

Виконано комплекс досліджень з чисельного моделювання розроблених алгоритмів оцінки параметрів трафіку МІС, як для стаціонарних, так і для нестационарних трафіків.

Для адитивної моделі трафіку виконано порівняльне дослідження розробленого алгоритму та оптимального фільтра Калмана, яке показало, що характеристики оцінювання параметрів трафіку розробленого алгоритму близькі до потенційно досяжних характеристик.

Наведено приклади застосування запропонованого алгоритму у завданнях управління якістю надання послуг зв'язку в МІС. До основних завдань управління якістю послуг зв'язку відносяться моніторинг та оцінка міжкінцевих затримок при передачі трафіку, задач моніторингу втрат мережеских пакетів, а також завдання оперативного виявлення аномальної поведінки мережевого трафіку. У всіх прикладах запропонований алгоритм показав високу ефективність функціонування за сукупністю критеріїв «оперативність – точність».

Розроблені у рамках другого наукового положення метод та алгоритм оцінки параметрів мережевого трафіку, які можуть функціонувати як у моделі інтегрованих, так і в моделі диференційованих забезпечень послуг зв'язку у МІС.

Отримані результати слід вважати прийнятними для забезпечення оперативного генерування рішень з управління якістю послуг зв'язку у МІС. Розроблений алгоритм оперативної оцінки параметрів трафіку функціонує у реальному масштабі часу. Його параметри повністю задовольняють вимогам щодо оперативності та точності.

4. НАУКОВО-ТЕХНІЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ ДЛЯ АПАРАТНО-ПРОГРАМНОЇ РЕАЛІЗАЦІЇ АЛГОРИТМІВ ОПЕРАТИВНОЇ ОЦІНКИ ПАРАМЕТРІВ ТРАФІКУ В МІС

4.1 Оцінка необхідних обчислювальних ресурсів для технічної реалізації алгоритмів оперативної оцінки параметрів трафіку у МІС

Для визначення критеріїв вибору існуючих чи перспективних апаратно-програмних засобів (АПЗ), на яких можуть бути технічно реалізовані розроблені алгоритми оперативної оцінки параметрів мережного трафіку в МІС, необхідно здійснити аналіз необхідних цього обчислювальних ресурсів.

Аналіз необхідних обчислювальних ресурсів проведемо для випадку, коли АПЗ допускають реалізацію паралельних обчислювальних процесів, і навіть у випадку, коли механізми паралельної обробки даних не реалізуються на обчислювальних засобах.

Розглянемо векторну процедуру (3.33) оцінки значень математичного очікування, СКВ та коефіцієнта варіації інтенсивності трафіку МІС.

Для оцінки значення математичного очікування $\hat{m}_x(i)$, яке оцінюється відповідно до рекурентної процедурою виду:

$$\hat{m}(i + 1) = \hat{m}(i) + \lambda_m(i + 1)(\hat{m}(i + 1) - \check{m}(i)) \quad (4.1)$$

де потрібно виконати для отримання значення функції прогнозу $N_1 - 1$ операцій додавання і одну операцію множення. N_1 - розмір ковзкого вікна, у якому обчислюється як оцінка функції прогнозу. Усі обчислення виконуються з плаваючою точкою. Загальна кількість операцій з плаваючою точкою для отримання поточного значення функції прогнозу дорівнює 1. Для виконання процедури, що коригує (4.1) потрібно виконати $N_2 + 3$ операцій. Для реалізації процедури сингтонного нечіткого логічного висновку,

необхідного для визначення значення коефіцієнта $\lambda_m(i+1)$ в (4.1), необхідно виконати приблизно 740 арифметичних операцій з плаваючою точкою [2, 3, 6, 47, 48, 71, 72, 79]. Таким чином, загальна кількість арифметичних операцій із плаваючою точкою для оцінки значення математичного очікування дорівнює $\approx N_1 + N_2 + 745$ де N_1 та N_2 – розмір ковзких вікон, у яких розраховується ця оцінка. Оптимальні розміри ковзких вікон для аналізованих класів розподілів склали 45 та 35 відліків. Якщо зробити 15% запас по необхідним обчислювальним ресурсам, то загальна кількість арифметичних операцій із плаваючою точкою складе ≈ 840 .

Процедура оцінки значення СКВ інтенсивності трафіку, що входить до (3.33), має вигляд:

$$\hat{\sigma}(i+1) = \hat{\sigma}(i) + \lambda_\sigma(i+1)(\hat{\sigma}(i+1) - \check{\sigma}(i)) \quad (4.2)$$

Для реалізації (4.2) потрібно близько $2N_1 + 4$ операцій для обчислення прогнозу, приблизно $N_2 + 4$ арифметичних операцій для обчислення коригуючої функції, а також, як і в першому випадку, необхідно виконати приблизно 740 арифметичних операцій для обчислення значення коефіцієнта кроку $\lambda_\sigma(i+1)$. Загальна кількість арифметичних операцій з плаваючою точкою, з урахуванням запасу в 15% обчислювальної продуктивності, становитиме приблизно 900 операцій.

Процедура оцінки значення коефіцієнта варіації інтенсивності трафіку, що входить до (3.33), має вигляд:

$$\hat{K}_v(i+1) = \hat{K}_v(i) + \lambda_{K_v}(i+1)(\hat{K}_v(i+1) - \check{K}_v(i)) \quad (4.3)$$

При реалізації функції прогнозу у цій процедурі потрібно приблизно $2N_1 + 5$ операцій із плаваючою точкою. Для обчислення коригувальних функцій необхідно виконати близько $N_2 + 5$ арифметичних

операцій. Для визначення значення $\lambda_{K_v}(i+1)$ потрібно приблизно 740 арифметичних операцій з плаваючою точкою. Загальна кількість операцій з урахуванням запасу обчислювальної продуктивності, як і в другому випадку, становитиме близько 920 операцій.

Усі оцінки мають бути отримані на інтервалі часу, що становить не більше 0.8 мкс (0.8×10^{-6} с).

Таким чином, отримані результати оцінок необхідної обчислювальної продуктивності для визначення параметрів трафіку можна подати у вигляді таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 - Результати оцінки обчислювальної продуктивності реалізації алгоритму (3.33).

№	Параметр	Необхідне кількість операцій	Необхідна продуктивність апаратно - програмних засобів
Послідовні розрахунки (незалежні оцінки кожного параметра)			
1	Математичне очікування	≈ 840	≈ 1.1 Гфлопс
2	СКВ	≈ 900	≈ 1.13 Гфлопс
3	Коефіцієнт варіації	≈ 920	≈ 1.2 Гфлопс
Разом: ≈ 3.45 Гфлопс			
Послідовні розрахунки (з можливістю спільного використання результатів розрахунків у процедурах оцінок параметрів трафіку)			
4	Математичне очікування	≈ 840	≈ 1.1 Гфлопс
5	СКО	≈ 870	≈ 1.11 Гфлопс
6	Коефіцієнт варіації	≈ 890	≈ 1.13 Гфлопс
Разом: ≈ 3.34 Гфлопс			
Паралельні розрахунки (з можливістю спільного використання результатів розрахунків у процедурах оцінок параметрів трафіка)			
7	Математичне очікування	≈ 915	≈ 1.2 Гфлопс
8	СКВ		
9	Коефіцієнт варіації		
Разом: ≈ 1.2 Гфлопс			

4.2 Вибір апаратно-програмних комплексів для створення інтелектуальних систем моніторингу трафіку

Аналіз та вибір апаратно-програмних засобів (АПЗ) для реалізації адаптивних алгоритмів оперативної оцінки параметрів трафіку є складним багатокритеріальним завданням, що вимагає аналізу різних альтернатив [73, 74, 108]. Основні критерії вибору АПЗ для створення інтелектуальних агентів (ІА), що здійснюють оцінку параметрів трафіку, детально представлені на рисунку 4.1.

Як показано на рисунку 4.2, ІА оцінки параметрів мережевого трафіку можуть створюватися як комп'ютерні системи, що входять до складу засобів мережевого адміністрування та управління або як вбудовані системи, що входять до складу мережевих елементів. У свою чергу, вбудовані системи можуть створюватися на основі високопродуктивних мікропроцесорних модулів, а також на основі спеціалізованих мікроконтролерів або систем на кристалі (SoC System On Chip), створених з урахуванням програмованих логічних інтегральних схем (ПЛІС, FPGA) [109 – 114].

На рисунку 4.2 подано основні способи технічної реалізації ІА оцінки параметрів трафіку.

Основні параметри існуючих та перспективних мікропроцесорів та мікропроцесорних модулів представлені в таблиці 4.2. У цій таблиці представлені показники обчислювальних засобів світових виробників.

Параметри та функціональні можливості спеціалізованих мікроконтролерів через їх функціональну обмеженість у даній роботі не розглядаються.

Коротко розглянемо основні параметри обчислювальної продуктивності мікропроцесорних приладів (МП), що випускаються серійно, а також створених на їх основі процесорних модулів та високопродуктивних персональних обчислювальних машин (ПЕОМ).

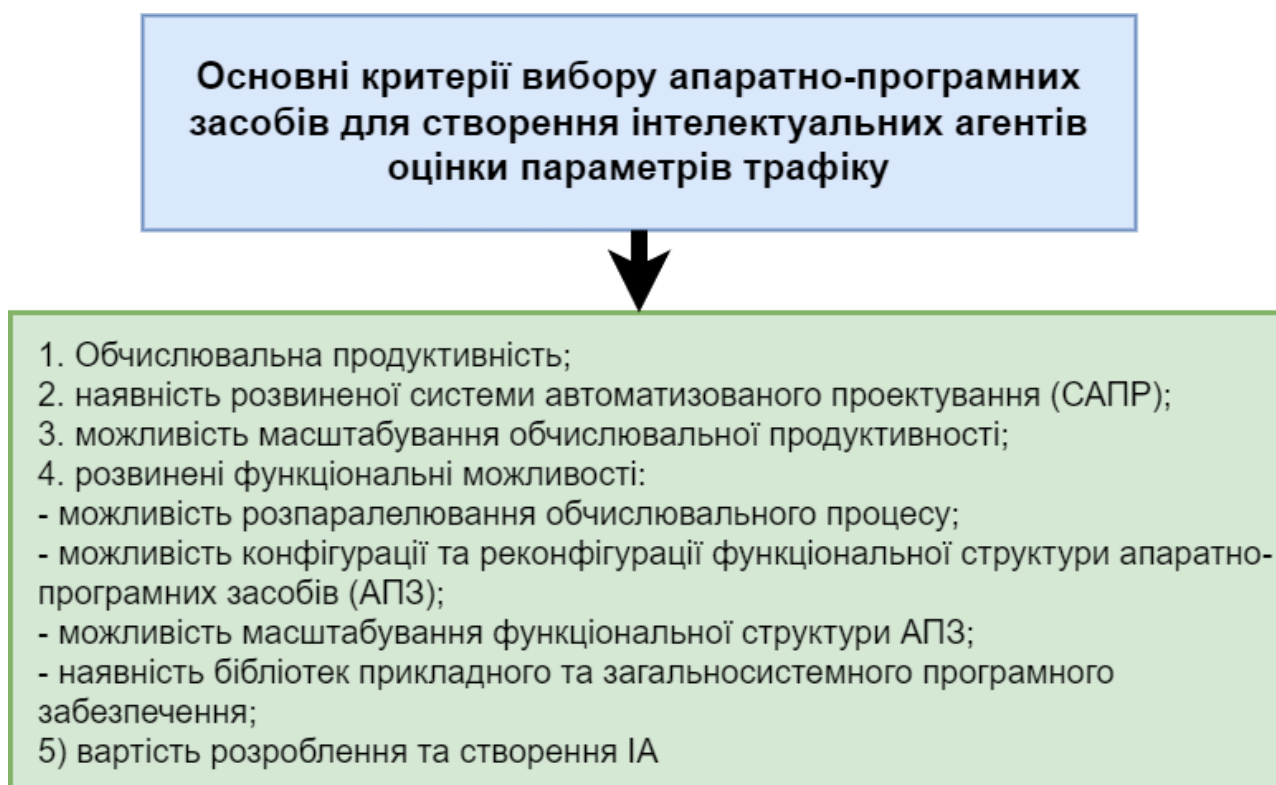


Рисунок 4.1 - Основні критерії вибору АПЗ для створення ІА

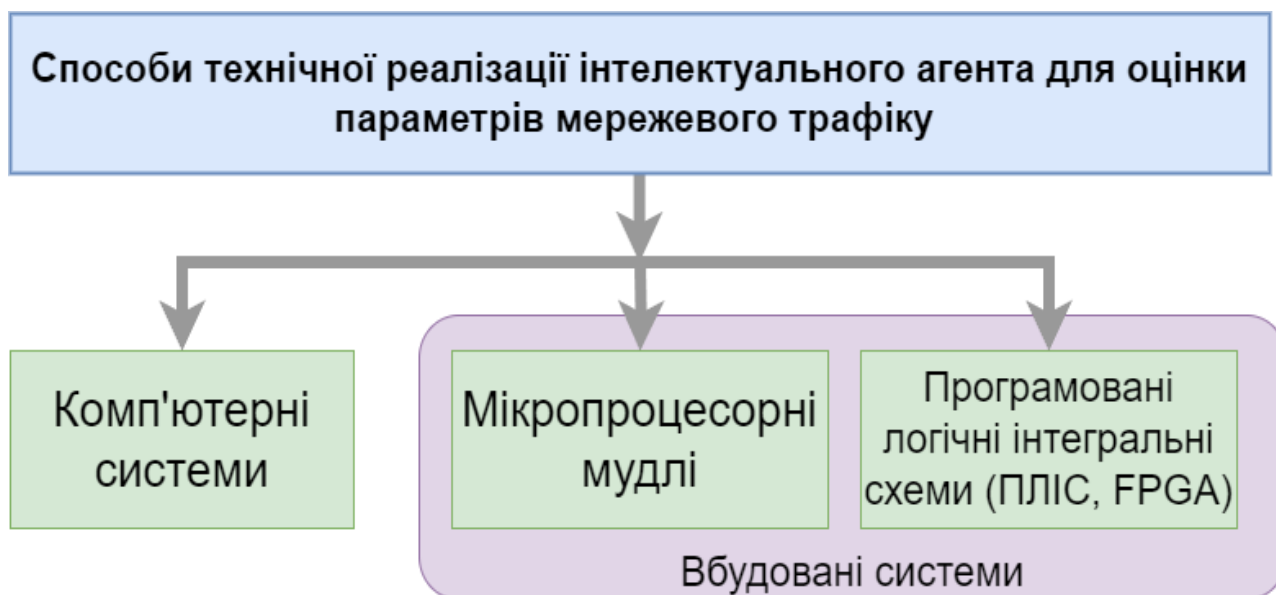


Рисунок 4.2 - Основні способи створення ІА оцінки параметрів трафіку

Таблиця 4.2 – Параметри основних типів мікропроцесорів

№	Найменування	Тактова частота	Кількість процесорних ядер	Продуктивність
Мікропроцесорні засоби світових виробників				
1	AMD Phenom II X6 1100T	3,3 ГГц	6 ядра	79,2 GFlops
2	AMD FX-8350	4,0 ГГц	8 ядра	128 GFlops
3	Intel Core i5-4430	3,2 ГГц	4 ядра	147 GFlops
4	Intel Core i7-4930K	3,4 ГГц	6 ядра	163 GFlops
5	Loongson-3B1500	1,5 ГГц	8 ядер	192 GFlops
6	AMD Ryzen 7 1700X	3,4 ГГц	8 ядра	217 GFlops
7	IBM Power8	4,4 ГГц	12 ядер	290 GFlops
8	Intel Core i7-5960X	3,0 ГГц	8 ядер	350 GFlops
9	Intel Xeon E-2388G	3,2-5,1 ГГц	8 – 16 ядер	410 GFlops
10	Intel Xeon D-2187NT	2,0-3,0 ГГц	16 – 32 ядер	870 GFlops

Одним з подібних типів високопродуктивних МП є «Intel Xeon D-2187NT» [110]. Цей МП є обчислювач серверного класу. До складу цього МП входять 16 процесорних ядер з 32 потоками, тактова частота досягає значення 3000 МГц. Архітектурні та функціональні рішення, реалізовані при створенні цього МП, дозволяють створювати високопродуктивні багатопроцесорні сервери, робочі станції, автоматизовані робітники місця та спеціалізовані обчислювачі. Основні функціональні параметри МП «Intel Xeon D-2187NT» представлені в таблиці 4.3 [110].

Таблиця 4.3 – Основні параметри МП «Intel Xeon D-2187NT»

Параметр МП	Значення параметра МП
Мікросхема	Intel Xeon D-2187NT - з тактовою частотою до 3000 МГц
Функціональна архітектура	Skylake
Параметри масштабованості	16 ядер в процесорі, 32 потоки
Тактова частота МП	3000 МГц

Пікова продуктивність	32 операції в такт в кожному ядрі; 870 GFLOPS; 435 GFLOPS подвійний точності
Кеш-пам'ять	L1: 64 Кбайт дані, 128 Кбайт команд у кожному ядрі; L2: 16 Мбайт, L3: 22 Мбайт у процесорі
RAM	4 канали DDR4-2667 registered ECC, до 85.33 Гб/с Гбайт/с; 512 Гбайт

МП «Intel Xeon D-2187NT» є процесорним елементом материнської плати "Supermicro X11SDW-14CN-TP13F+", на основі якої серійно випускаються промислові високопродуктивні комп'ютери [110]. Плата «Supermicro X11SDW-14CN-TP13F+» має дев'ять інтерфейсів Ethernet 1000 Base - T, чотири інтерфейси 10G SFP+, чотири інтерфейси USB 2.0, два інтерфейси USB 3.1 Gen1 type A. Цей пристрій може використовуватися як окремий функціональний апаратно-програмний модуль для застосування в якості вбудованої системи.

В даний час інтенсивно розвивається технологія "система на кристалі" (SoC), яка дозволяє створювати мініатюрні функціонально закінчені модулі, реалізовувати методи паралельних обчислень, що дозволяє підвищити швидкість обробки вхідних даних. Основою цієї технології є сучасні великі програмовані логічні інтегральні схеми (ПЛІС, FPGA), функції яких визначаються користувачем. До складу ПЛІС, як правило, входять процесорні модулі, що оперативно запам'ятовують функціональні модулі (Random Access Memory - RAM), набір різних інтерфейсів, а також логічна матриця великої ємності. Конфігурація різних функціональних модулів, що входять до складу ПЛІС, проводиться програмним способом за допомогою розвиненої системи автоматизованого проектування (САПР), а також програмно встановлюваних типових бібліотечних функціональних модулів для вирішення конкретних прикладних завдань [114].

Як приклад, у таблиці 4.4 наведено параметри ПЛІС, що відноситься до класу SoC сімейства Cyclone V фірми "Altera" [110].

Слід зазначити, що виробниками FPGA, що мають розвинену функціональність і високу обчислювальну продуктивність, в даний час є кілька великих світових і вітчизняних підприємств і фірм, що виробляють мікроелектронні вироби [110 - 114], а засоби автоматизованого проектування пристроїв (САПР), створених цими виробниками, стали стандартними в даній предметній області.

На сьогоднішній день основним методом проектування систем на кристалі (SoC) є підхід, заснований на використанні IP-ядер [110 - 114], які представляють собою стандартні функціональні програмні блоки для обробки інформації.. Функціональні блоки IP-ядер попередньо створюються за допомогою САПР як прикладного програмного забезпечення і можуть включатися у відповідні бібліотеки систем САПР.

Таблиця 4.4 – Параметри сімейства ПЛІС Cyclone V (« Altera »)

Параметр, функціональний модуль	Значення параметра і Характеристики функціонального модуля
Процесор	Двоядерний ARM Cortex™-A9, максимальною робочою частотою 800 МГц
Співпроцесор	Медіапроцесор ARM Neon™ з підтримкою векторних обчислень з плаваючою точкою (VFP) подвійної точності
Кеш першого рівня L1	32 Кбайт інструкцій, 32 Кбайт даних
Кеш другого рівня L2	512 Кбайт загального доступу
Внутрішня пам'ять	64 Кбайт RAM і 64 Кбайт ROM пам'яті
Ethernet	Два контролера 10/100/1000 Ethernet; Контролер прямого доступу до пам'яті (DMA)
Інтерфейси	Два контролери USB 2.0; Два інтерфейси UART; Чотири інтерфейси SPI; Чотири інтерфейси I ² C; Два контролера CAN 2.0; До 71 лінії введення/виводу спільного призначення і 14 ліній введення

Блок FPGA	
Логічних елементів	до 110 тис.
Адаптивних логічних модулів	до 41509
Внутрішня RAM пам'ять	до 5570 Кбіт
Помножувачів 18x19	до 224
DSP-блоків	до 112
Схем PLL	до 6

Також IP-ядра можуть бути створені і розробниками SoC . Це дозволяє суттєво зменшити термін розробки виробу, підвищити його функціональні можливості, надійність і ступінь уніфікації [110 - 114].

4.3. Науково-технічні пропозиції програмного забезпечення для реалізації алгоритмів оперативної оцінки параметрів трафіку в МІС

На рисунку 4.3. наведено приклад запропонованої реалізації інтелектуального агента у вигляді комп'ютерної системи, що входить до складу підсистеми оперативної підтримки рішень (ПОПР) автоматизованої системи керування зв'язком МІС (АСУЗ МІС).

На цьому рисунку червоний стрілкою показано логічна взаємодія через мережу різних ІА. Для забезпечення взаємодії різних ІА використовуються стандартні протоколи , що входять у протокольний стек TCP/IP.

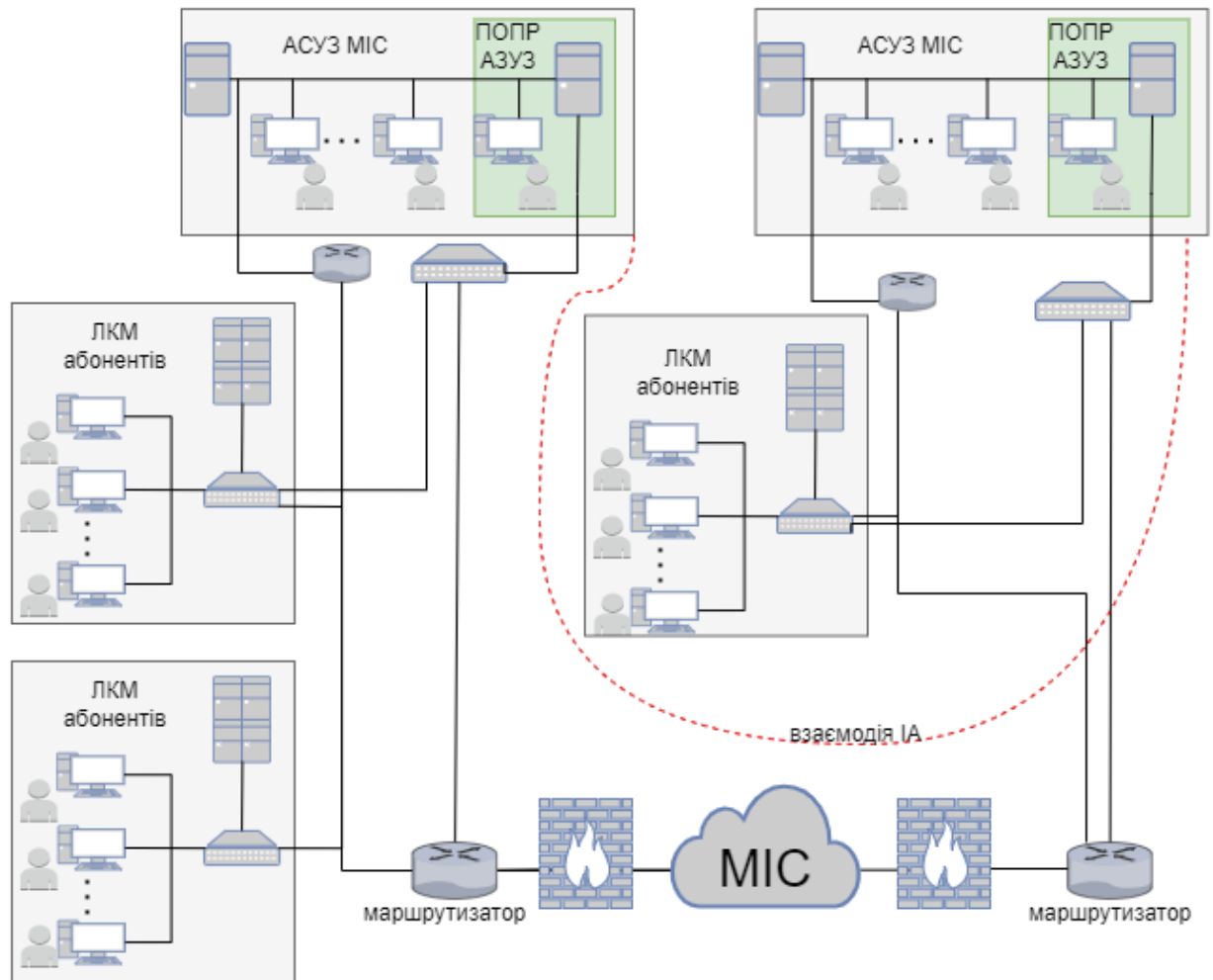


Рисунок 4.3. Приклад реалізації ІА оцінки параметрів трафіку у вигляді комп'ютерної системи

Сервер ПОПР може бути технічно реалізований, наприклад на процесорній платі «Supermicro X11SDW-14CN-TP13F+». У цьому випадку один сервер може одночасно контролювати в режимі реального часу приблизно до 100 інтерфейсів. Решта продуктивності потрібно для формування керуючого рішення та його реалізації. Маршрутизатор ПОПР АСУЗ МІС здійснює дзеркалування інтерфейсів для аналізу трафіку [7].

Приклад реалізації інтелектуального агента як вбудованої системи наведено на рисунку 4.4. У цьому прикладі як контрольований мережевий елемент використовується маршрутизатор.

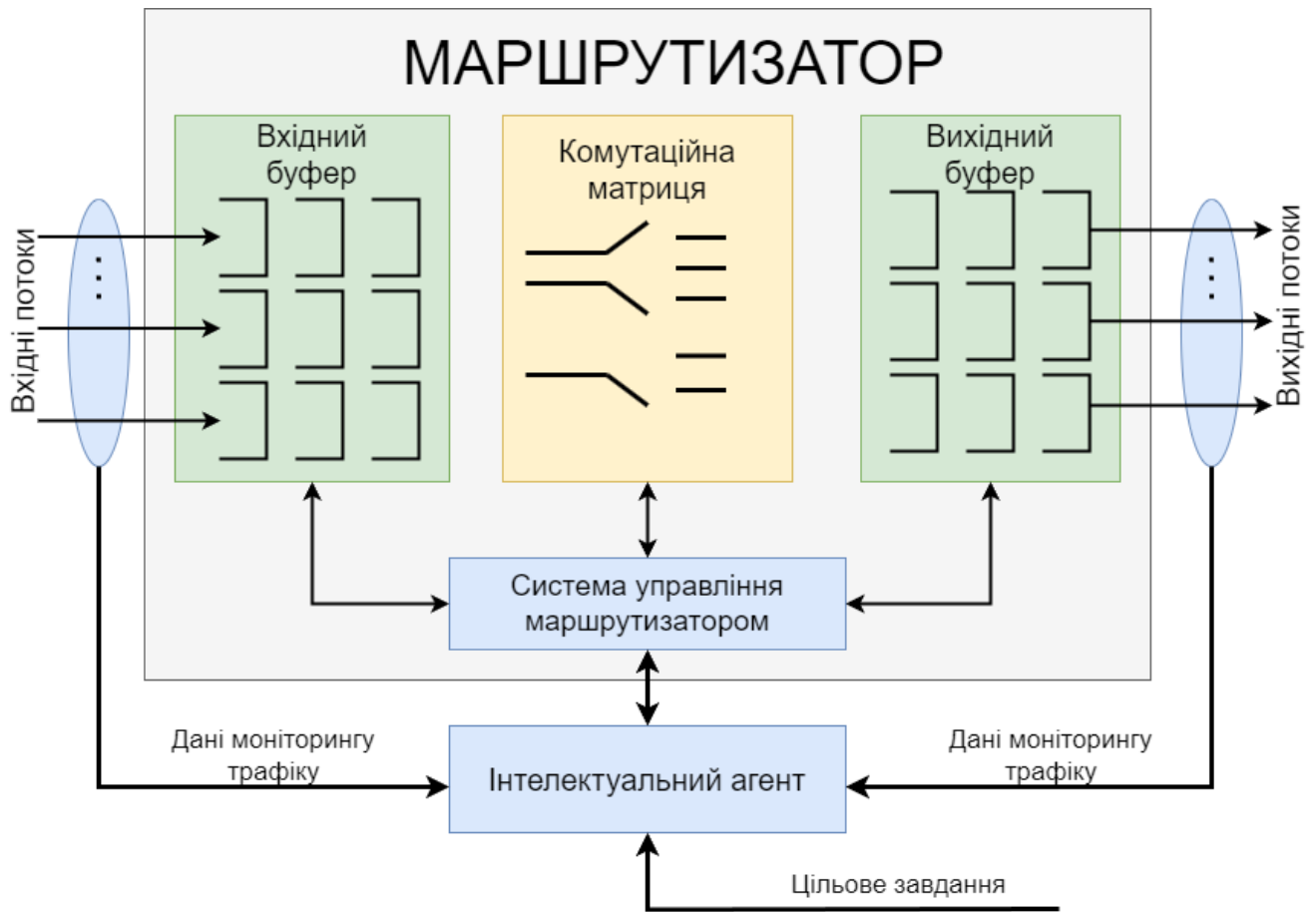


Рисунок 4.4 – приклад реалізації ІА як вбудованої системи

При реалізації ІА як вбудованої системи доцільно і якості апаратно - програмних засобів, на яких він реалізується вибрати або готову високопродуктивну процесорну плату або систему на кристалі, побудовану на основі високопродуктивних FPGA.

При створенні ІА на основі мікропроцесорної материнської плати, необхідна обчислювальна продуктивність на порт становить приблизно 3.45 Гфлопс. Отже, при середній продуктивності мікропроцесора 48 Гфлопс, можна контролювати десять інтерфейсів. Решта обчислювальної продуктивності процесора необхідна для вироблення та реалізації рішень з управління якістю послуг зв'язку.

Приклад структури ІА як інтегрованої системи, реалізованої на FPGA, наведено на рисунку 4.5.

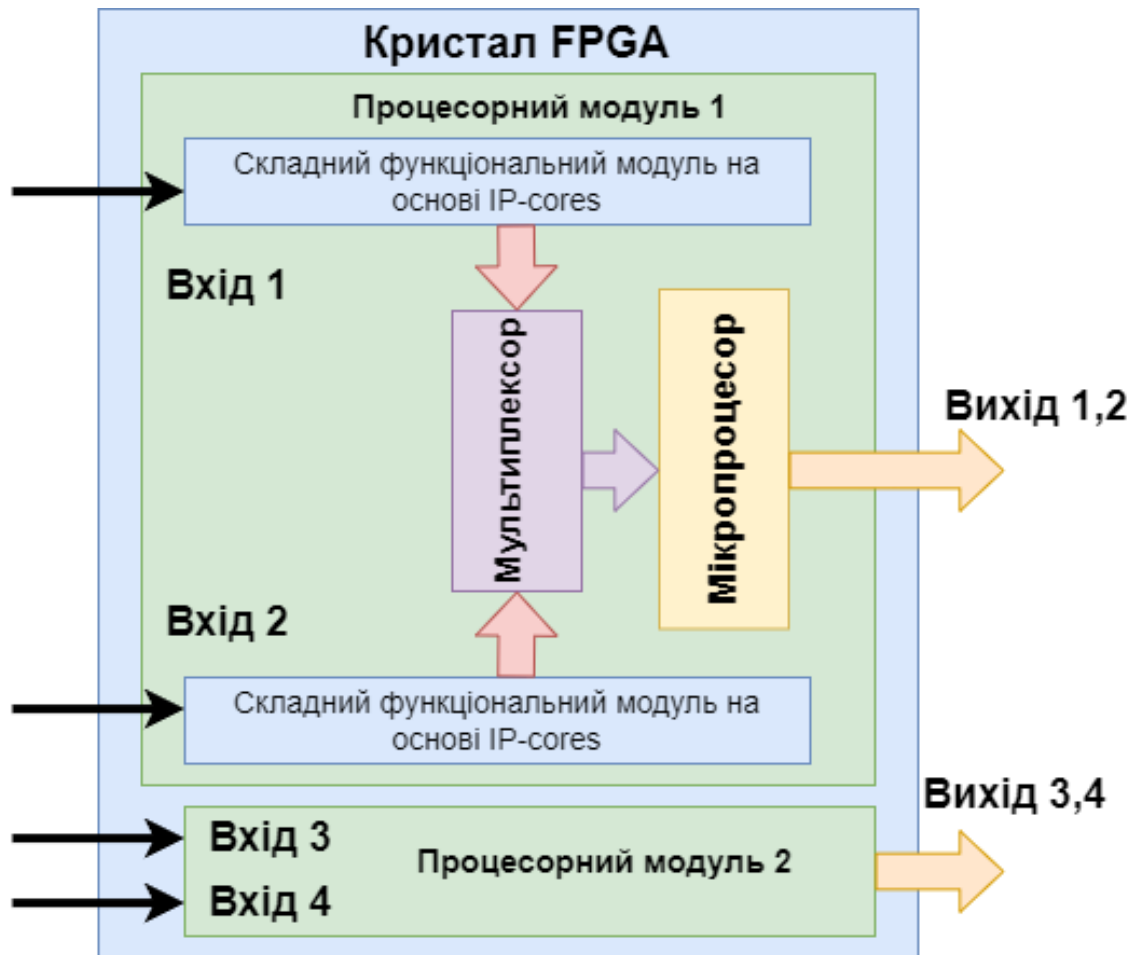


Рисунок 4.5 – Структура ІА на основі FPGA

У цьому прикладі розглядається можливість реалізації ІА як SoC. Як FPGA обрано мікросхему Cyclone V фірми «Altera». Дана мікросхема у своєму складі містить два вбудовані двоядерні мікропроцесори ARM Cortex™-A9, обчислювальна продуктивність кожного з яких становить приблизно 4.8 Гфлопс, а також співпроцесор ARM Neon™ з підтримкою векторних обчислень з плаваючою точкою (VFP) подвійної точності. Процедури (4.1) – (4.3) реалізуються складними функціональними модулями (СФМ), створеними на основі бібліотечних типових блоків IP-cores. До них відносяться блоки додавання, віднімання, поділу, що накопичують суматори зі скиданням, лінії затримки на обчислювальний такт [115]. Процедура нечіткого логічного висновку та ухвалення рішення реалізується вбудованими мікропроцесорами. При цьому один процесор обслуговує два інтерфейси. Таким чином, при заданих часових характеристиках отримання оцінок

параметрів мережевого трафіку на одному кристалі FPGA Cyclone V фірми «Altera» можна реалізувати SoC, яка контролює чотири високошвидкісних інтерфейси.

На рисунку 4.6 наведено приклад реалізації складного функціонального блоку на основі IP-cores, що реалізує алгоритм оцінки параметрів мережного трафіку.

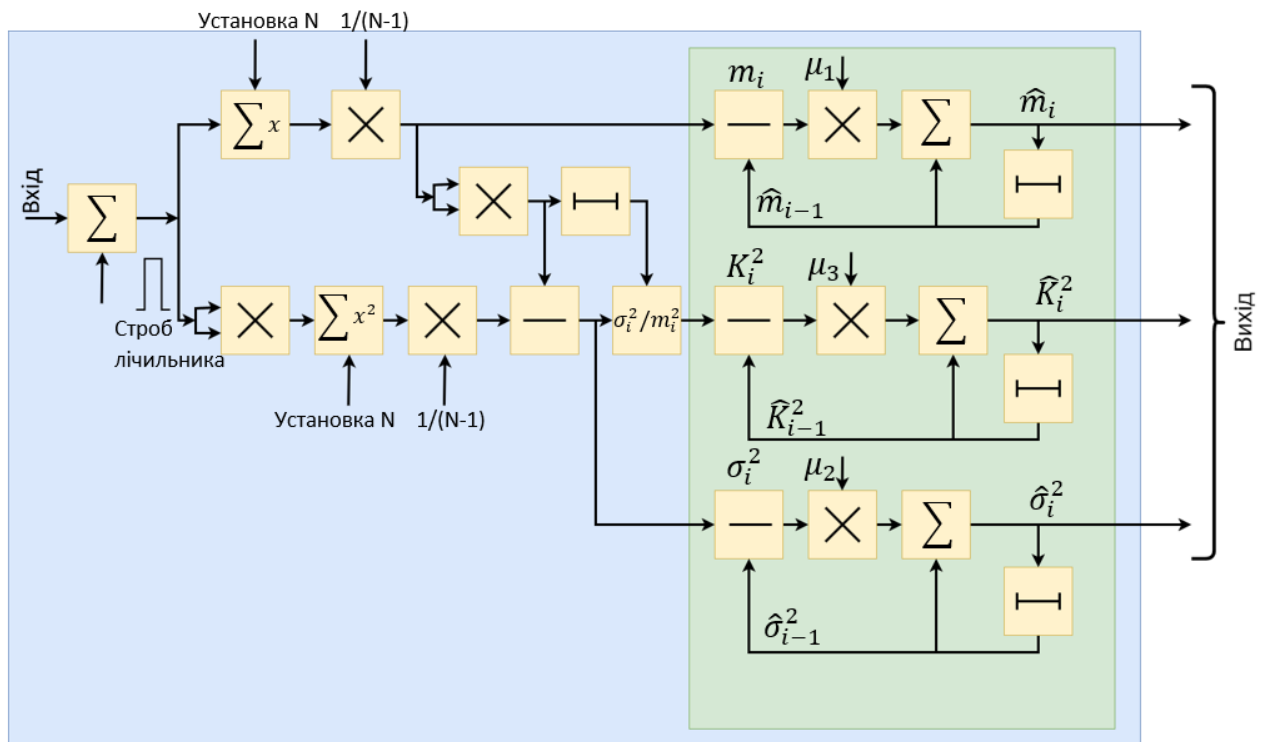


Рисунок 4.6 - Структура складного функціонального блоку оцінки параметрів трафіку

Для розробки СФМ оцінки параметрів мережевого трафіку використовуються засоби САПР Quartus II для ПЛІС «Altera» та мова програмування Verilog [111, 112, 113].

Як Операційні системи, на основі яких функціонують ІА, можуть бути обрані або ОС Linux (різних версій, що підтримуються МП модулями), або ОС реального часу QNX [5].

У таблиці 4.5 наведено порівняльні характеристики технічних реалізацій ІА оцінки параметрів мережевого трафіку для управління якістю послуг зв'язку.

Таблиця 4.5 – Порівняльні Характеристики можливих технічних реалізацій інтелектуального агента

№	Спосіб реалізації інтелектуального агента	Складність технічної реалізації	Функціональність	Застосування
1	Комп'ютерні системи	низька	середня	Стаціонарні системи
2	Мікропроцесорні модулі, плати	середня	вище середнього	стаціонарні системи, малообслуговуючі вузли комутації
3	ПЛІС (FPGA)	висока	висока	малообслуговуючі вузли комутації, експериментальні вироби

Дані в таблиці 4.5 показують, що розроблені науково-технічні пропозиції щодо створення ІА є досить гнучкими у своїй реалізації та функціональними можливостями. Конкретний спосіб реалізації ІА визначається розробником АСУЗ МІС.

4.4 Результати створення макету інтелектуального агента для оцінювання параметрів трафіку в МІС

Для експериментальної перевірки характеристик розроблених алгоритмів оперативної оцінки параметрів трафіку МІС було розроблено та створено експериментальний макет, структурну схему яку наведено рисунку 4.7. До складу макета входять дві високопродуктивні ПК, що працюють під керуванням операційної системи (ОС) Windows 10, маршрутизатор, інтелектуальний агент, створений як SoC, на основі FPGA ПЛІС (FPGA) фірми «Altera» CycloneV на налагоджувальному комплекті Cyclone V SX SoC Development Board [139]. Всі канали локальної обчислювальної мережі являли

собою вилі парі Ethernet з пропускними здібностями 1 Гбіт/с. У цьому експерименті на ПК 1 проводились генерація трафіку із заданими імовірнісними законами розподілів, а також аналіз отриманих експериментальних даних.

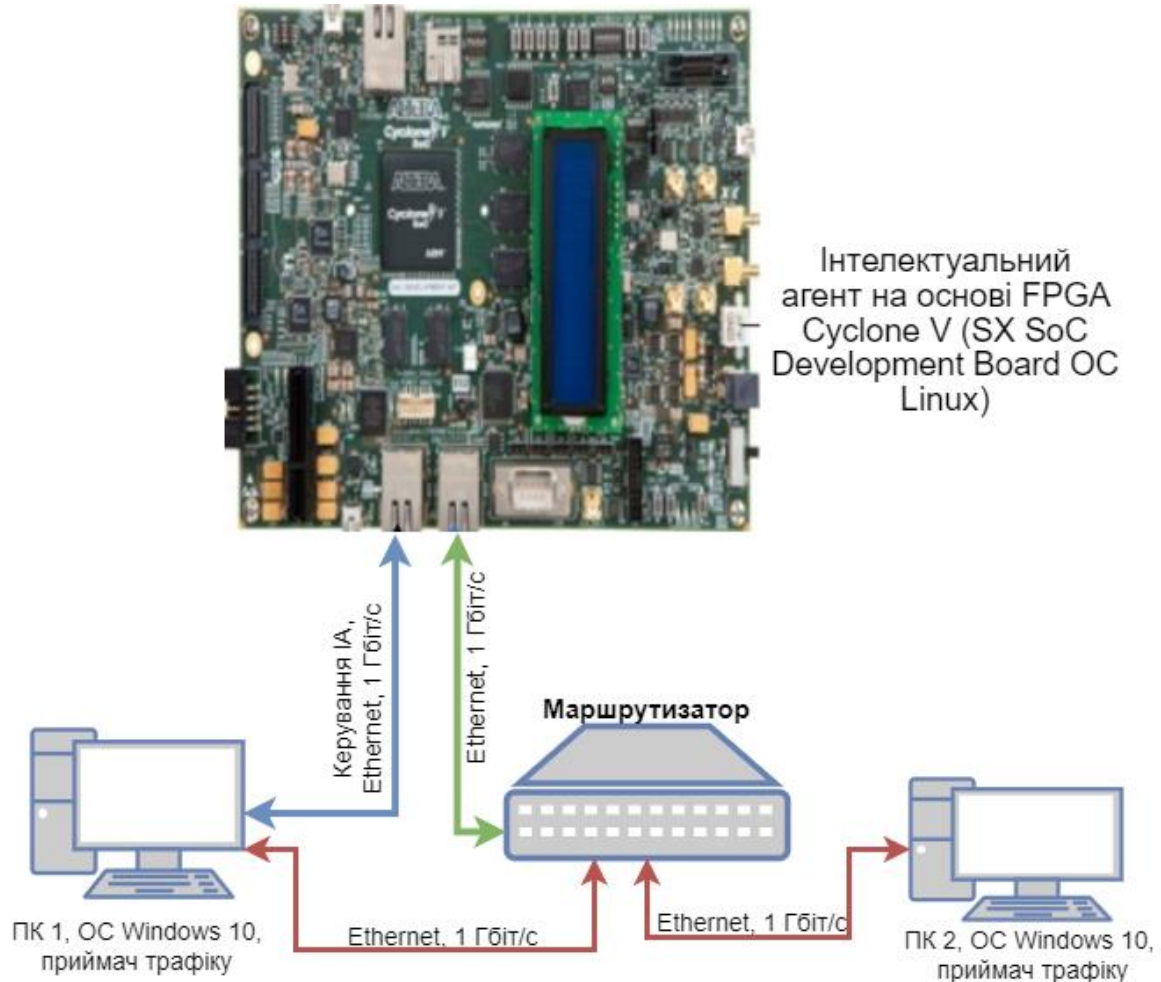


Рисунок 4.7 - Структура експериментального макета

ПК 2 служила приймачем трафіку. На маршрутизаторі виконувалася процедура віддзеркалення трафіку. Дзеркальний трафік із відповідного інтерфейсу маршрутизатора надходив на вхідний інтерфейс ІА. Управління ІА проводилося з ПК 1.

Експеримент виконувався у такому порядку. На ПК 1 генерувалися серії трафіків, що мають логарифмічно нормальний та пуасонівський закони розподілу. Тривалість кожної серії трафіку становила 12 секунд. Відліки

інтенсивності трафіку вироблялися з періодом 1 мкс (10^{-6} с). Таким чином, на кожній серії було отримано 12×10^6 відліків. На ІА з допомогою ПК 1 запускалися досліджувані алгоритми оцінки параметрів трафіку, які функціонували в режимі реального часу. Результати оцінки параметрів трафіку з ІА передавалися на ПК 1, де проводилися порівняння з вихідними (модельними) значеннями параметрів трафіку.

У ході виконання експерименту було отримано такі результати.

Для логарифмічно нормального закону розподілу, зміна математичного очікування якого моделювалася процесом AP – 1, середня відносна похибка оцінки поточного значення $m_x(i)$ склала $\delta \approx 2.43$ %, при середньому його значенні 344 Кбіт/сек. При цьому діапазон зміни $m_x(i)$ за час 0,7 секунд склав приблизно 1.7 рази. Середня відносна похибка оцінки поточного значення СКВ $\sigma_x(i)$ склала $\delta \approx 5.21$ %, а коефіцієнта варіації $\delta \approx 4.26$ %.

Для пуассонівського закону розподілу, зміна математичного очікування якого також моделювалася процесом AP – 1, середня відносна похибка оцінки поточного значення $m_x(i)$ склала $\delta \approx 0.83$ %, при середньому його значенні 237 Кбіт/сек. При цьому діапазон зміни $m_x(i)$ за час 0,5 секунд склав приблизно 1,5 рази. Середня відносна похибка оцінки поточного значення СКВ $\sigma_x(i)$ склала $\delta \approx 3.34$ %, а коефіцієнта варіації $\delta \approx 2.13$ %.

Таким чином, у роботі експериментально підтверджено характеристики розроблених алгоритмів оперативної оцінки параметрів трафіку МІС, які дозволяють реалізовувати раціональне управління якістю послуг зв'язку в режимі часу близькому до реального.

4.5 Висновки до четвертого розділу

В четвертому розділі отримано такі нові науково–технічні результати:

Здійснено оцінку обчислювальної складності для технічної реалізації алгоритмів оперативної оцінки параметрів трафіку МІС, що функціонують в реальному масштабі часу. Розглянуто режими послідовного виконання

кроків алгоритмів, паралельних обчислень, а також варіант послідовно-паралельних обчислень. Максимальна обчислювальна продуктивність апаратно програмних засобів (у разі послідовної організації обчислювального процесу), на яких створюються інтелектуальні агенти оперативної оцінки параметрів мережевого трафіку, що має бути не менше 3,45 Гфлопс, при паралельному способі організації обчислювального процесу це значення становить близько 1,2 Гфлопс .

Виконано аналіз та сформульовано критерії та пропозиції щодо вибору апаратно - програмних засобів, на яких можна створити інтелектуальний агент оперативної оцінки параметрів мережного трафіку. Показано, що ІА з необхідними характеристиками оцінки параметрів трафіку у високошвидкісних мультисервісних мережах зв'язку можна реалізувати на існуючих апаратно - програмні засобах, які серійно випускаються світовими, виробниками апаратно–програмних засобів.

Розроблено варіанти структур реалізації ІА на основі комп'ютерних систем, а також на основі принципів реалізації вбудованих систем, які включають варіант реалізації ІА на основі високопродуктивних мікропроцесорних модулів та варіант реалізації ІА як системи на кристалі (SoC), виконаної на основі програмованих логічних інтегральних схем (ПЛІС, FPGA). При цьому структури ІА розроблялися на типових апаратно-програмних засобах, що серійно виготовляються. Зроблено рекомендації щодо вибору апаратно – програмних засобів для технічної реалізації ІА.

Було розроблено та створено макет для експериментальної перевірки характеристик алгоритмів оперативної оцінки параметрів трафіку. Проведені на цьому макеті експериментальні перевірки характеристик алгоритмів оперативної оцінки параметрів трафіку повністю підтвердили їхню високу ефективність.

ВИСНОВКИ

У ході виконання дисертаційної роботи було отримано такі нові наукові та практичні результати:

Розроблено концептуальну модель та архітектуру підсистеми оперативного оцінювання характеристик трафіку для автоматизованого управління якістю послуг (QoS) в мультисервісних інформаційних системах, яка в відмінно від існуючих дозволяє:

- оцінювати поточний стан мережного трафіку корпоративних мультисервісних мереж зв'язку загалом, забезпечуючи необхідну якість та повноту оцінок, і формувати рішення для мережевого управління QoS у режимі, який максимально наближений до реального часу;

- знизити інтенсивність службового трафіку, що сприяє управлінню QoS у підмережах та мережевих доменах корпоративних мультисервісних мереж зв'язку, від трьох до восьми разів.

У процесі створення методології алгоритму оперативного оцінювання параметрів мережевого трафіку для управління якістю послуг зв'язку, що функціонує в режимі реального часу в умовах режимів функціонування мережі, які динамічно змінюються, а також за наявності можливих неточностей, неповноти, багатовимірності та різномірності даних мережевого моніторингу на основі концепції умовної нелінійної Парето – оптимальної фільтрації В.С. Пугачова виконано синтез адаптивного алгоритму оцінки параметрів трафіку корпоративної мультисервісної мережі зв'язку, що функціонує в режимі реального часу та належать до класу псевдоградієнтних адаптивних алгоритмів із нечітким регулюванням.

Точність отриманого алгоритму є в 1.4 - 1.8 рази вищою порівняно з іншими аналогічними методами, та в найгірших випадках середня помилка не перевищує 8.3%.

За критерієм χ^2 були визначені конкретні значення розмірів ковзких

вікон, при якому відбувається нормалізація випадкової послідовності. Це, на відміну від інших методів забезпечує сталість структури алгоритму оцінки параметрів та характеристик трафіку, незалежно від його ймовірнісних характеристик.

Здійснено узагальнення розроблених алгоритмів для оцінювання векторних характеристик та параметрів інтенсивності трафіку в мультисервісних інформаційних системах. Також розроблено процедуру регулювання параметрів алгоритму оцінки характеристик трафіку, яка базується на методах нечіткого логічного висновку Такагі-Сугено.

Отримані результати дослідження при чисельному модулюванні розроблених алгоритмів оперативної оцінки параметрів трафіку МІС як для стаціонарних, так і для нестаціонарних трафіків.

Для адаптивної моделі трафіку проведено порівняльну характеристику між розробленим алгоритмом та оптимальним фільтром Калмана. Результати показали, що характеристики оцінювання параметрів трафіку за допомогою розробленого алгоритму є близькими до теоретично можливих оптимальних характеристик.

Наведено приклади застосування запропонованого алгоритму в задачах управління якістю послуг зв'язку, що надаються, у МІС. До основних завдань управління якістю послуг зв'язку належать моніторинг і оцінка міжкінцевих затримок під час передавання трафіку, завдання моніторингу втрат мережевих пакетів, а також завдання оперативного виявлення аномальної поведінки мережевого трафіку. У всіх прикладах запропонований алгоритм показав високу ефективність функціонування за сукупністю критеріїв "оперативність - точність".

Показано, що розроблені в рамках другого наукового положення метод і алгоритм оцінювання параметрів мережевого трафіку можуть функціонувати як у моделі інтегрованих, так і в моделі диференційованих послуг зв'язку в МІС.

У рамках третього наукового положення проведено оцінку обчислювальної складності для технічної реалізації алгоритмів оперативної

оцінки параметрів трафіку МІС, які функціонують у реальному масштабі часу. Розглянуто режими послідовного виконання покрокового алгоритму, паралельних обчислень, а також варіант послідовно-паралельних обчислень. Максимальна обчислювальна продуктивність апаратно - програмних засобів (у разі послідовної організації обчислювального процесу), на яких створюються інтелектуальні агенти оперативного оцінювання параметрів мережевого трафіку, має бути не меншою, ніж 3,45 Гфлопс, у разі паралельного способу організації обчислювального процесу ця величина становить близько 1,2 Гфлопс.

Проведено аналіз і сформульовано критерії та рекомендації щодо вибору апаратно-програмних засобів, які можуть бути використані для створення інтелектуального агента для оперативної оцінки параметрів мережного трафіку. Дослідження показало, що необхідні характеристики для оцінки параметрів трафіку в високошвидкісних мультисервісних мережах зв'язку можна досягти за допомогою вже існуючих апаратно-програмних ресурсів.

Розроблено варіанти структур реалізації ІА на основі комп'ютерних систем, а також на основі принципів реалізації вбудованих систем, які включають варіант реалізації ІА на основі високопродуктивних мікропроцесорних модулів та варіант реалізації ІА як системи на кристалі (SoC), виконаної на основі програмованих логічних інтегральних схем (ПЛІС, FPGA). Надано рекомендації щодо вибору апаратно – програмних засобів для технічної реалізації ІА.

Розроблено макет для експериментальної перевірки характеристик алгоритмів оперативної оцінки параметрів трафіку, що дозволило точно оцінити їхню функціональність та ефективність. Експерименти, проведені на створеному макеті, підтвердили високу ефективність розроблених алгоритмів, та продемонстрували їх здатність до точного реагування на зміни в мережевому трафіку.

Технічне впровадження нових наукових і технічних результатів, отриманих у цій дисертаційній роботі, дозволить значно зменшити час,

необхідний для ухвалення рішень в контексті оперативного управління якістю зв'язкових послуг у мультисервісних інформаційних системах.

Дослідження, проведені в рамках даної роботи, дозволили розробити нові алгоритми для оперативного оцінювання параметрів трафіку, які сприяють автоматизованому управлінню якістю послуг (QoS) у мультисервісних інформаційних системах. Також були визначені основні напрямки для їх практичної реалізації.

Достовірність результатів дослідження підкріплюється коректним застосуванням математичних положень, термінів та методик доведення і обґрунтування висновків, що також підтверджується результатами проведених експериментальних досліджень. Таким чином, наукове завдання, поставлене в дисертації, було успішно виконано, а поставлена мета досягнута.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Треньова К.О., Власенко О.В., Методика розрахунку часу затримки в системі керування інфокомунікаційними мережами на базі теорії масового обслуговування, *Науковий журнал "Зв'язок"*, №6(166), с. 3-7, 2023
2. Треньова К.О., Адаптивний метод і алгоритм оперативного оцінювання параметрів трафіку у високошвидкісних мережах зв'язку, *Науковий журнал «Наукові записки Державного університету телекомунікацій»* №2(4), с. 107-115 2023
3. Треньова К.О., Оптимізація методів прийому сигналів для підвищення завадостійкості широкосмугових систем зв'язку, *Науковий журнал «Телекомунікаційні та інформаційні технології»*, №1(82), с. 79-87, 2024
4. Треньова К.О., Ветлицька О.С. Виявлення атак у мережах інтернету речей методами машинного навчання, *Сучасний захист інформації*, №1(57), с. 39-49, 2024
5. Треньова К.О., Марчук О.М., Миронюк М.Ю., Високопродуктивна архітектура VLSI для вдосконалених моделей QPSK, *Науковий журнал "Зв'язок"*, №4(158), с. 54-57, 2022
6. Треньова К.О., Дробик О.В., Метод оперативного оцінювання стану мережевих елементів для забезпечення якості послуг у корпоративних високошвидкісних мультисервісних мережах зв'язку, *Науковий журнал "Зв'язок"*, №2(168), с. 30-38, 2024
7. Kurose J. F. Computer networking: A top-down approach. 6-те вид. Boston : Pearson, 2012. 864 с.
8. International Telecommunication Union // Recommendation Y.120 URL: <https://www.itu.int/rec/T-REC-Y.120-199806-I/en>
9. Wang P., Lin S.-C., Luo M. A Framework for QoS-aware Traffic Classification Using Semi-supervised Machine Learning in SDNs. 2016 IEEE International Conference on Services Computing (SCC), м. San Francisco, CA, USA, 27 черв. – 2 лип. 2016 р. 2016. URL: <https://doi.org/10.1109/scc.2016.133>
10. International Telecommunication Union // Recommendation Y.2011 URL: <https://www.itu.int/rec/T-REC-Y.2011-200410-I/en>
11. International Telecommunication Union // Recommendation Y.2001 URL: <https://www.itu.int/rec/T-REC-Y.2001>
12. International Telecommunication Union // Recommendation Y.100 URL:

<https://www.itu.int/rec/T-REC-Y.100-199806-I/en>

13. Walrand J. Communication Networks. 2-ге вид. McGraw Hill Higher Education, 2002. 336 с.

14. Мультимедійна підсистема (IMS) URL: <https://uk.theastrologypage.com/ip-multimedia-subsystem>

15. Davie B. S., Peterson L. L. Computer Networks: A Systems Approach. 4-те вид. Burlington, Massachusetts : Elsevier Science & Technology, 2021. 848 с.

16. Freeman R. L. Telecommunication System Engineering. 4-те вид. Hoboken, NJ, USA : John Wiley & Sons, Inc., 2004. 991 с. URL: <https://doi.org/10.1002/0471728489>

17. Архітектура TMN <http://um.co.ua/8/8-17/8-17816.html>

18. Inc C. S., Systems I. C. Internetworking Technologies Handbook, Fourth Edition. 4-те вид. Cisco Press, 2003. 1110 с.

19. Bertsekas D. P. Network optimization: Continuous and discrete methods. Belmont, Mass : Athena Scientific, 1998. 593 с.

20. International Telecommunication Union // Recommendation M.3010 URL: <https://www.itu.int/rec/T-REC-M.3010>

21. International Telecommunication Union // Recommendation M.3020. URL: <https://www.itu.int/rec/T-REC-M.3020>

22. International Telecommunication Union // Recommendation M.3400. URL: https://www.itu.int/rec/T-REC-M.3400/_page.print

23. International Telecommunication Union // Recommendation M.3100 [сайт]. URL: <https://www.itu.int/rec/T-REC-M.3100/en>

24. CMIP / CMIS – Object Oriented Network Management [сайт]. URL: <http://www.cellsoft.de/telecom/cmip.html>

25. International Telecommunication Union // Recommendation X.711. [сайт]. <https://www.itu.int/rec/T-REC-X.711/en>

26. RFC 1095. The Common Management Information Services and Protocols for the Internet (CMOT and CMIP). – 1990. – October.

27. Operating systems : internals and design principles. 8-ме вид. Pearson, 2015. 800 с.

28. Capgemini [сайт]. URL: <https://www.capgemini.com>.

29. Feit S. TCP/IP: Architecture, Protocols, and Implementation with IPv6 and IP Security (McGraw-Hill Computer Communications Series). 2-ге вид. McGraw-Hill Companies, 1996. 577 с.
30. International Telecommunication Union // Recommendation M.3050.1 [сайт]. <https://www.itu.int/rec/T-REC-M.3050.1/en>
31. International Telecommunication Union // Recommendation M.3050.2. <https://www.itu.int/rec/T-REC-M.3050.2>
32. RFC 1450 URL: <https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc1450>
33. Stallings W. SNMP, SNMPv2, SNMPv3, and RMON 1 and 2. – Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc., 1998.
34. Salina J. L. Next Generation Networks: Perspectives and potentials. Chichester, England : J. Wiley & Sons, 2007. 229 с.
35. Benchmarking Peer-to-Peer Systems / ред.: W. Effelsberg, R. Steinmetz, T. Strufe. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2013. 205 с. URL: <https://doi.org/10.1007/978-3-642-38673-2>
36. Davie B. S., Peterson L. L. Computer Networks: A Systems Approach. 4-те вид. Burlington, Massachusetts : Elsevier Science & Technology, 2021. 848 с.
37. Tudzarov A. Quality of Service in next generation mobile and wireless networks: Way towards new service based 5G architecture. Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2012. 152 с.
38. Siyan K., Parker T., Siyan K. B. TCP/IP Unleashed (3rd Edition). 3-те вид. Sams, 2002. 1000 с.
39. International Telecommunication Union // Recommendation E.800. URL: <https://www.itu.int/rec/T-REC-E.800-200809-I>
40. International Telecommunication Union // Recommendation G.1000. URL: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.1000/en>
41. International Telecommunication Union // Recommendation Y.1540. URL: <https://www.itu.int/rec/T-REC-Y.1540>
42. Ayers M. L. Telecommunications system reliability engineering, theory, and practice. Hoboken, N.J : Wiley, 2012. 231 с.
43. Reliability and optimization of structural systems: Assessment, design, and life-cycle performance : proceedings of the thirteenth IFIP WG 7.5 Working Conference on Reliability and Optimization of Structural Systems Kobe, Japan, Japan, October 11-14 2006 / ред.: F. D. M, K. Mitsuo, K. Chul-Woo. London :

Taylor & Francis, 2007. 269 c.

44. Maeda Y. QoS standards for ip-based networks / Y. Maeda // IEEE Communication Magazine. – 2003. – Vol. 41 – Is. 6. – Pp. 80. DOI: 10.1109/MCOM.2003.1204751.

45. Shahhosseini T. Artificial intelligence in Fuzzy logic. LAP LAMBERT Academic Publishing, 2017. 172 c.

46. Artificial Intelligence in Models, Methods and Applications / ред.: O. Dolinina та ін. Cham : Springer International Publishing, 2023. URL: <https://doi.org/10.1007/978-3-031-22938-1>

47. Pedrycz W., Ekel P., Pereira J. G. Multicriteria Decision-Making under Conditions of Uncertainty: A Fuzzy Set Perspective. Wiley & Sons, Incorporated, John, 2020. 280 c.

48. Das A. K., Mukherjee A. Essentials of Fuzzy Soft Multisets: Theory and Applications. Springer Singapore Pte. Limited, 2022. 160 c.

49. RFC 781 URL: <https://datatracker.ietf.org/doc/rfc781/>

50. RFC 815 URL: <https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc815>

51. RFC 1633 URL: <https://www.rfc-editor.org/rfc/rfc1633.txt>

52. RFC 2475 URL: <https://www.rfc-editor.org/rfc/rfc2475.txt>

53. RFC 1825 URL: <https://www.rfc-editor.org/rfc/rfc1825.txt>

54. RFC 1826 URL: <https://www.rfc-editor.org/rfc/rfc1826.txt>

55. RFC 1827 URL: <https://www.rfc-editor.org/rfc/rfc1827.txt>

56. RFC 1828 URL: <https://www.rfc-editor.org/rfc/rfc1828.txt>

57. RFC 1829 URL: <https://www.rfc-editor.org/rfc/rfc1829.txt>

58. RFC 1889 URL: <https://www.rfc-editor.org/rfc/rfc1889.txt>

59. Das A. K., Mukherjee A. Essentials of Fuzzy Soft Multisets: Theory and Applications. Springer Singapore Pte. Limited, 2022. 160 c.

60. International Telecommunication Union // Recommendation H.323 URL: <https://www.itu.int/rec/T-REC-H.323>

61. Sheluhin O. I. Self-similar processes in telecommunications. Chichester, UK : Wiley, 2007. 314 c.

62. Ghazel C., Saïdane L. Satisfying QoS Requirements in NGN Networks Using a Dynamic Adaptive Queuing Delay Control Method. *Procedia Computer Science*. 2015. T. 56. C. 225–232. URL: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2015.07.203>
63. Sayama H. Introduction to the Modeling and Analysis of Complex Systems. Open SUNY Textbooks, 2015. 496 c.
64. Matía F., Marichal G. N., Jiménez E. Fuzzy Modeling and Control: Theory and Applications. Atlantis Press (Zeger Karssen), 2014. 303 c.
65. Mamdani E.H. Higher-order logics for handling uncertainty in expert systems / E.H. Mamdani, H.J. Efstathion // «Int. J. Man-Mach. Stud.2. – 1985. – № 3. – p.243-259.
66. Network Modeling, Simulation and Analysis in MATLAB: Theory and Practices / D.-N. Le та ін. Wiley & Sons, Incorporated, John, 2019. 376 c.
67. Lejk M., Deeks D. An Introduction to Systems Analysis Techniques (2nd Edition). Addison Wesley, 2002. 294 c.
68. Williamson S. G., Bender E. A. Mathematics for Algorithm and Systems Analysis. Dover Publications, 2005. 256 c.
69. Mesarovic M., Takahara Y. General Systems Theory: Mathematical Foundations. Elsevier, 1975. 322 p. URL: [https://doi.org/10.1016/s0076-5392\(08\)x6129-6](https://doi.org/10.1016/s0076-5392(08)x6129-6)
70. Gegov A. Fuzzy Networks for Complex Systems: A Modular Rule Base Approach. Berlin, Heidelberg : Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010. 304 c.
71. Kochenderfer M. J. Decision Making Under Uncertainty: Theory and Application. MIT Press, 2015. 323 c.
72. Marugan A. P., Marquez F. P. G. Decision-Making Management: A Tutorial and Applications. Elsevier Science & Technology Books, 2017. 148 c.
73. Peterson L. L. Computer networks: A systems approach. 5-те вид. Amsterdam : Morgan Kaufmann, 2012. 920 c.
74. Coordination Languages and Models: Third International Conference, COORDINATION'99, Amsterdam, The Netherlands, April 26-28, 1999, Proceedings (Lecture Notes in Computer Science) / ред.: P. C. (Editor), A. L. W. (Editor). Springer, 1999. 420 c.
75. Kuo B. C. Automatic control systems. 7-ме вид. Englewood Cliffs, N.J : Prentice Hall, 1995. 897 c.

76. Theory of Hierarchical, Multilevel, Systems. Elsevier, 1970. URL: [https://doi.org/10.1016/s0076-5392\(08\)x6134-x](https://doi.org/10.1016/s0076-5392(08)x6134-x)

77. General Systems Theory: Mathematical Foundations. Elsevier, 1975. 322 c. URL: [https://doi.org/10.1016/s0076-5392\(08\)x6129-6](https://doi.org/10.1016/s0076-5392(08)x6129-6)

78. Applied Fuzzy Systems / ред.: Т. Terano, К. Asai, М. Sugeno. Academic Press, 1989. 314 c. URL: <https://doi.org/10.1016/c2013-0-11592-9>

79. Manheim M. L. Hierarchical Structure: A Model of Design and Planning Processes. The MIT Press, 1967. 271 c.

80. Keshav S. Mathematical foundations of computer networking. Upper Saddle River, NJ : Addison-Wesley, 2012. 496 c.

81. El-Naggar A. A., Atallah Salem F. Fundamentals of automation and industrial control systems using plc: automation and control technologies. LAP LAMBERT Academic Publishing, 2011. 212 c.

82. Kochenderfer M. J. Decision Making Under Uncertainty: Theory and Application. MIT Press, 2015. 323 c.

83. Sivanandam S. N., Sumathi S., Deepa S. N. Introduction to Fuzzy Logic using MATLAB. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2007. 444 c. URL: <https://doi.org/10.1007/978-3-540-35781-0>

84. Кофман А. Введение в теорию нечетких множеств /А. Кофман. – М.: Радио и связь, 1982. – 432с.

85. Applications of Fuzzy Optimization and Fuzzy Decision Making / ред. V. C. Gerogiannis. MDPI, 2021. 416 c. URL: <https://doi.org/10.3390/books978-3-0365-2266-1>

86. Matía F., Marichal G. N., Jiménez E. Fuzzy Modeling and Control: Theory and Applications. Atlantis Press (Zeger Karssen), 2014. 288 c.

87. Robertazzi T. G. Computer networks and systems: Queueing theory and performance evaluation. New York : Springer-Verlag, 1990. 306 c.

88. Gross D. Fundamentals of queueing theory. 4-те вид. Hoboken, NJ : J. Wiley & Sons, 2008. 528 c.

89. Cramér H. Mathematical Methods of Statistics. Princeton, NJ, USA : Princeton University Press, 1999. 575 c.

90. Coleman C. Introduction to Radio Frequency Engineering. Cambridge University Press, 2011. 334 c.

91. Kosko B. Fuzzy systems as universal approximator / B. Kosko // In Proc. of the IEEE Int. Conf. on Fuzzy Systems, San Diego. – 1992. – P. 1153-1162.
92. Wang L. X. Fuzzy systems are universal approximators / L. X. Wang // In Proc. of the IEEE Int. Conf. on Fuzzy Systems, San Diego. – 1992. – P. 1163-1169.
93. Kershenbaum A. Telecommunications network design algorithms. New York : McGraw-Hill, 1993. 368 c.
94. Singh K., Agrawal S. Internet Traffic Classification: A Machine Learning Approach. LAP LAMBERT Academic Publishing, 2011. 100 c.
95. Kovačević B., Đurović Ž. Fundamentals of Stochastic Signals, Systems and Estimation Theory with Worked Examples. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2008. 380 c. URL: <https://doi.org/10.1007/978-3-540-70991-6>
96. Kailath T. Lectures on Wiener and Kalman Filtering. Vienna : Springer Vienna, 1981. 191 c. URL: <https://doi.org/10.1007/978-3-7091-2804-6>
97. Grimmett G. Probability and random processes: Problems and solutions. Oxford : Clarendon Press, 1991. 366 c.
98. Schuss Z. Nonlinear Filtering and Optimal Phase Tracking. Springer, 2014. 280 c.
99. Celant G., Broniatowski M. Interpolation and Extrapolation Optimal Designs Vol. 1: Polynomial Regression and Approximation Theory. Wiley & Sons, Incorporated, John, 2016.
100. Anderson B. D. O. Optimal filtering. Englewood Cliffs, N.J : Prentice-Hall, 1979. 357 c.
101. Nevelson M. B., Hasminskii R. Z. Stochastic Approximation and Recursive Est (Translations of Mathematical Monographs). American Mathematical Society, 1998. 244 c.
102. Chong E. K. P., Żak S. H. An Introduction to Optimization. Hoboken, NJ, USA : John Wiley & Sons, Inc., 2008. 584 c. URL: <https://doi.org/10.1002/9781118033340>
103. Ben-Naim A. Information Theory - Part I: An Introduction to the Fundamental Concepts. World Scientific Publishing Co Pte Ltd, 2017. 220 c.
104. Lee S., Nedic A. Distributed Random Projection Algorithm for Convex Optimization. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing. 2013. T. 7, № 2. C. 221–229. URL: <https://doi.org/10.1109/jstsp.2013.2247023>
105. Zhengyan L., Chuanrong L. Limit Theory for Mixing Dependent

Random Variables (Mathematics and Its Applications). Springer, 1997. 344 с.

106. Takagi T., Sugeno M. Fuzzy Identification of Systems and Its Applications to Modeling and Control // IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics. – 1985. – vol.15. – no.1. – pp.11-132.

107. Sturm C., Pontes J., Héctor J. J. De Los Santos. Radio Systems Engineering: A Tutorial Approach. Springer, 2016. 272 с.

108. Yadin A. Computer Systems Architecture. Chapman and Hall/CRC, 2016. 467 с.

109. Goonatileke S. T., Hettige B. Past, Present and Future Trends in Multi-Agent System Technology. Journal Européen des Systèmes Automatisés. 2022. T. 55, № 6. C. 723–739. URL: <https://doi.org/10.18280/jesa.550604>

110. Intel® Xeon® D-2187NT Processor
URL: <https://www.intel.com/content/www/us/en/products/sku/136440/intel-xeon-d2187nt-processor-22m-cache-2-00-ghz/specifications.html>

111. Intel. URL: <http://intel.com>

112. CPU – World. URL: <http://cpu-world.com>

113. Computerworld [сайт]. URL: <http://computerworld.com>

114. Xilinx. URL: <https://www.xilinx.com/>

115. Open cores. URL: <http://opencores.org/projects>