

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Західноукраїнський національний університет
Факультет комп'ютерних інформаційних технологій
Кафедра кібербезпеки

УНІЧЕНКО Павло Володимирович

**Модель маршрутизації в мультисервісній мережі в умовах
зовнішніх деструктивних впливів / A model of routing in a
multiservice network under external destructive influences**

спеціальність: 125 – Кібербезпека та захист інформації
освітньо-професійна програма – Кібербезпека

Кваліфікаційна робота

Виконав студент групи КБм -21
П.В. Уніченко

Науковий керівник
д.т.н., професор М.М.Касянчук

Кваліфікаційну роботу допущено
до захисту:

« ____ » _____ 2024 р.

Завідувач кафедри

_____ В.В.Яцків

ТЕРНОПІЛЬ – 2024

Факультет комп'ютерних інформаційних технологій
Кафедра кібербезпеки
Освітній ступінь «магістр»
спеціальність: 125 – Кібербезпека та захист інформації
освітньо-професійна програма – Кібербезпека

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
_____ В.В.Яцків
« ____ » _____ 2023 року

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ
УНІЧЕНКО ПАВЛО ВОЛОДИМИРОВИЧ

1. Тема кваліфікаційної роботи:

Модель маршрутизації в мультисервісній мережі в умовах зовнішніх деструктивних впливів / A model of routing in a multiservice network under external destructive influences

керівник роботи д.т.н., професор М.М. Касянчук

затверджені наказом по університету від «12» грудня 2023 року №753.

2. Строк подання студентом закінченої кваліфікаційної роботи 12 грудня 2024 р.

3. Вихідні дані до кваліфікаційної роботи: завдання на кваліфікаційну роботу студента, наукові статті, технічна література.

4. Основні питання, які потрібно розробити:

- аналіз сучасних методів та узагальненої функціональної моделі маршрутизації у мультисервісних мережах зв'язку;
- вдосконалення класифікації методів та протоколів маршрутизації у мережах зв'язку;
- розробка математичної моделі маршрутизації за умов зовнішніх деструктивних впливів на елементи мультисервісної мережі зв'язку;
- розробка методики визначення плану розподілу інформації на однорідній комірчастій мережі зв'язку великої розмірності;
- імітаційне моделювання мультисервісної мережі зв'язку в умовах обмежених мережевих ресурсів;
- аналіз результатів математичного моделювання маршрутизації в умовах зовнішніх деструктивних впливів на елементи мультисервісної мережі зв'язку.

5. Перелік графічного матеріалу у роботі:

- градієнтний ймовірно-детермінований послідовний метод маршрутизації з логічним формуванням плану розподілу інформації;
- вихідна структура аналізованої мультисервісної мережі зв'язку;

- порядок виходу маршрутизаторів з ладу;
- результати імітаційного моделювання при різних пропускових здатностях;
- нормовані результати моделювання;
- початкова структура ММЗ;
- залежності ймовірності відмови в обслуговуванні в цілому по мультисервісній мережі зв'язку (інтегральна оцінка).

6. Консультанти розділів кваліфікаційної роботи

	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання 12 грудня 2023 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строки виконання етапів кваліфікаційної роботи	Примітка
1	Огляд та класифікація сучасних методів маршрутизації у мультисервісних мережах зв'язку	12.2023 р. – 03.2024 р.	
2	Розроблення моделей маршрутизації в мультисервісній мережі зв'язку в умовах зовнішніх деструктивних впливів	03.2024 р. – 06.2024 р.	
3	Аналіз результатів моделювання маршрутизації в умовах зовнішніх деструктивних впливів на елементи мультисервісної мережі зв'язку	06.2024 р. – 11.2024 р.	

Студент _____ Уніченко П.В.
(підпис)

Керівник роботи _____ д.т.н., професор М.М.Касянчук

АНОТАЦІЯ

Випускна кваліфікаційна робота на тему „Модель маршрутизації в мультисервісній мережі в умовах зовнішніх деструктивних впливів” на здобуття освітнього ступеня «Магістр» зі спеціальності 125 „Кібербезпека та захист інформації” освітньо-професійної програми «Кібербезпека» написана обсягом 84 сторінки і містить 33 ілюстрації, 3 таблиці, 1 додаток та 30 джерел за переліком посилань.

Метою випускної кваліфікаційної роботи є розробка моделі захисту інформації в мультисервісній мережі в умовах зовнішніх деструктивних впливів.

Методи дослідження. Математичні методи моделювання, методи маршрутизації, методи дослідження мереж.

Результати дослідження. Здійснено аналіз сучасних методів маршрутизації в мультисервісних мережах зв'язку, що дозволило обґрунтувати класифікацію протоколів маршрутизації та показати недоліки вказаних класів в умовах зовнішніх деструктивних впливів. Розроблено математичну модель маршрутизації за умов зовнішніх деструктивних впливів на елементи мультисервісної мережі зв'язку, що дозволило розробити методи перевірки графа мережі на зв'язність та методику визначення плану розподілу інформації. Проаналізовано результати математичного моделювання маршрутизації в умовах вхідного самоподібного трафіку та зовнішніх деструктивних впливів на елементи мультисервісної мережі зв'язку, що дозволило встановити переваги запропонованої моделі. Здійснено імітаційне моделювання мультисервісної мережі зв'язку в умовах обмежених мережевих ресурсів та зовнішніх деструктивних впливів, що дозволило проаналізувати результати статистичного моделювання маршрутизації на спрощеній імітаційній моделі мережі зв'язку.

Результати роботи можуть успішно застосовуватися для захисту мультисервісних мереж при умовах зовнішніх деструктивних впливів.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: МУЛЬТИСЕРВІСНА МЕРЕЖА, ДЕСТРУКТИВНИЙ ВПЛИВ, РЕСУРСИ МЕРЕЖІ, МОДЕЛЬ ЗАХИСТУ, ЗАХИСТ ІНФОРМАЦІЇ.

ABSTRACT

The graduate work on the topic „A model of routing in a multiservice network under external destructive influences” for Master’s degree on speciality 125 "Cybersecurity and information protection " is written on 84 pages and contains 33 illustrations, 3 tables, 1 supplement and 30 references.

The aim of graduate work is to develop a model of information protection in a multi-service network under external destructive influences.

Research methods. Mathematical modeling methods, routing methods, network research methods.

Results of the study. An analysis of modern routing methods in multi-service communication networks was carried out, which allowed to substantiate the classification of routing protocols and show the shortcomings of the specified classes under external destructive influences. A mathematical model of routing under conditions of external destructive influences on elements of a multiservice communication network has been developed, which has allowed the development of methods for checking the network graph for connectivity and a method for determining the information distribution plan. The results of mathematical modeling of routing under conditions of incoming self-similar traffic and external destructive influences on elements of a multiservice communication network have been analyzed, which has allowed the establishment of the advantages of the proposed model. Simulation modeling of a multiservice communication network under conditions of limited network resources and external destructive influences has been carried out, which has allowed the analysis of the results of statistical modeling of routing on a simplified simulation model of a communication network.

The results of the work can be successfully applied to protect multiservice networks under conditions of external destructive influences.

Keywords: MULTI-SERVICE NETWORK, DESTRUCTIVE IMPACT, NETWORK RESOURCES, PROTECTION MODEL, INFORMATION PROTECTION.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	8
1 ОГЛЯД ТА КЛАСИФІКАЦІЯ СУЧАСНИХ МЕТОДІВ МАРШРУТИЗАЦІЇ У МУЛЬТИСЕРВІСНИХ МЕРЕЖАХ ЗВ'ЯЗКУ.....	12
1.1 Основні терміни та узагальнена функціональна модель маршрутизації в мультисервісних мережах зв'язку.....	12
1.2 Огляд сучасних методів маршрутизації у мультисервісних мережах зв'язку.....	15
1.3 Сучасні методи вибору вихідних трактів у вузлах комутації мультисервісних мереж зв'язку	19
1.4 Класифікація методів маршрутизації у мережах зв'язку	21
1.5 Класифікація протоколів маршрутизації у бездротових мережах...	24
2 РОЗРОБЛЕННЯ МОДЕЛЕЙ МАРШРУТИЗАЦІЇ В МУЛЬТИСЕРВІСНІЙ МЕРЕЖІ ЗВ'ЯЗКУ В УМОВАХ ЗОВНІШНІХ ДЕСТРУКТИВНИХ ВПЛИВІВ.....	29
2.1 Математична модель впливу методів формування плану розподілу інформації на обсяг доступних мережевих ресурсів	29
2.2 Розробка математичної моделі маршрутизації за умов вхідного самоподібного трафіку та зовнішніх деструктивних впливів на елементи мультисервісної мережі зв'язку	36
2.3 Аналіз та розробка методів перевірки графа мережі на зв'язність....	40
2.4 Розробка методики визначення плану розподілу інформації на однорідній комірчастій мережі зв'язку великої розмірності	43
3 АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ МОДЕЛЮВАННЯ МАРШРУТИЗАЦІЇ В УМОВАХ ЗОВНІШНІХ ДЕСТРУКТИВНИХ ВПЛИВІВ НА ЕЛЕМЕНТИ МУЛЬТИСЕРВІСНОЇ МЕРЕЖІ ЗВ'ЯЗКУ	49
3.1 Імітаційне моделювання мультисервісної мережі зв'язку в умовах обмежених мережевих ресурсів	49

3.2 Аналіз результатів математичного моделювання маршрутизації в умовах вхідного самоподібного трафіку та зовнішніх деструктивних впливів на елементи мультисервісної мережі зв'язку.....	60
3.3 Аналіз результатів статистичного моделювання маршрутизації на спрощеній імітаційній моделі мережі зв'язку	63
ВИСНОВКИ.....	67
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	68
ДОДАТОК А Копії публікацій.....	71

ВСТУП

З розвитком телекомунікаційних технологій вибір протоколів маршрутизації не втратив свою актуальність. Питанням класифікації та дослідженню методів маршрутизації присвячено безліч статей, монографій та дисертацій. Фундаментальною роботою у цій галузі слід визнати монографію Medhi D. та Ramasamy K. [1]. Достатньо повна класифікація методів маршрутизації у мобільних мережах зв'язку наведена Lang D. у роботі «On the Evaluation and Classification of Routing Protocol for Mobile Ad Hoc Networks» [2].

Як правило, пропоновані класифікації ґрунтуються на кількох ключових характеристиках та зводяться до наступних типів маршрутизації [3]:

- 1) статична чи динамічна;
- 2) централізована чи розподілена;
- 3) від джерела чи покрокова;
- 4) одноколійна або багатокільнісна;
- 5) однопараметрична чи багатопараметрична;
- 6) однорівнева чи ієрархічна;
- 7) внутрішньодомenna та міждомenna;
- 8) стану каналу чи вектора відстаней.

Слід зазначити, що ці класифікації лише констатують існуючі підходи і показують перспективні методи маршрутизації.

Отже, спектр методів маршрутизації, які можна застосувати на мережах зв'язку, дуже широкий - від найпростіших, фіксованих процедур, до дуже складних [4-5]. Кожен з них має свої переваги та недоліки. Зокрема, класифікація методів маршрутизації для мереж зв'язку враховує незалежні процедури формування плану розподілу інформації (ПРІ) на мережі (протоколи маршрутизації); вибір вихідних ліній, трактів, каналів зв'язку у вузлах комутації (ВК) (протоколи сигналізації) [6-7]. Ця класифікація дозволяє:

- виявити множину варіантів реалізації як послідовних, так і паралельних (багатокільнісних) методів маршрутизації (наприклад: "Детермінований дифузний

послідовний з використанням лавинного методу формування ПРІ» - RIP, OSPF, BGP, PNNI та ін);

- провести цілеспрямований аналіз та синтез тих методів маршрутизації, які будуть найбільш ефективно функціонувати в передбачуваних мережах зв'язку та в заданих умовах.

Вибір методу маршрутизації значною мірою впливає на ефективність використання ресурсів мережі та якість обслуговування програм, доступних користувачам. Водночас проведення натурних досліджень на діючих мережах пов'язано з суттєвими технічними, організаційними та фінансовими труднощами. Тому як інструментарій для аналізу впливу маршрутизації на QoS-додатки мережі зв'язку застосовують імітаційне та математичне моделювання [8-9].

На сьогодні як математичний апарат використовують теорію графів, масового обслуговування, ланцюгів Маркова, нечітких множин, нейронних мереж, ігор, мереж Петрі та інших [10-11]. Застосування настільки широкого діапазону математичних підходів обумовлено складністю та специфікою предмета аналізу. Особливо ускладнюється завдання дослідження методів маршрутизації, які знайшли свою реалізацію в технологіях IP (Internet Protocol), ATM (Asynchrony Transfer Mode) та MPLS (Multiprotocol Label Switching), на мережах зв'язку великих розмірностей [12-13] та в умовах зовнішніх деструктивних впливів на її елементи, що і визначає актуальність даної роботи.

Мета роботи. Метою даної роботи є розробка моделі захисту інформації при маршрутизації в мультисервісній мережі в умовах зовнішніх деструктивних впливів.

Для вирішення поставленої мети вирішуються наступні **завдання**:

- аналіз сучасних методів та узагальненої функціональної моделі маршрутизації у мультисервісних мережах зв'язку;
- вдосконалення класифікації методів та протоколів маршрутизації у мережах зв'язку;

- розробка математичної моделі маршрутизації за умов зовнішніх деструктивних впливів на елементи мультисервісної мережі зв'язку;
- розробка методики визначення плану розподілу інформації на однорідній комірчастій мережі зв'язку великої розмірності;
- імітаційне моделювання мультисервісної мережі зв'язку в умовах обмежених мережевих ресурсів;
- аналіз результатів математичного моделювання маршрутизації в умовах зовнішніх деструктивних впливів на елементи мультисервісної мережі зв'язку.

Об'єкт дослідження. Процес захисту інформації при маршрутизації в мультисервісній мережі в умовах зовнішніх деструктивних впливів.

Предмет дослідження. Методи і засоби захисту інформації при маршрутизації в мультисервісній мережі в умовах зовнішніх деструктивних впливів.

Методи дослідження. Математичні методи моделювання, методи маршрутизації, методи дослідження мереж.

Наукова новизна одержаних результатів.

1. Здійснено аналіз сучасних методів маршрутизації в мультисервісних мережах зв'язку, що дозволило обґрунтувати класифікацію протоколів маршрутизації та показати недоліки вказаних класів в умовах зовнішніх деструктивних впливів.

2. Розроблено математичну модель маршрутизації за умов вхідного самоподібного трафіку та зовнішніх деструктивних впливів на елементи мультисервісної мережі зв'язку, що дозволило розробити методи перевірки графа мережі на зв'язність та методику визначення плану розподілу інформації.

3. Проаналізовано результати математичного моделювання маршрутизації в умовах вхідного самоподібного трафіку та зовнішніх деструктивних впливів на елементи мультисервісної мережі зв'язку, що дозволило встановити переваги запропонованої моделі.

Практичне значення отриманих результатів. Здійснено імітаційне моделювання мультисервісної мережі зв'язку в умовах обмежених мережевих

ресурсів та зовнішніх деструктивних впливів, що дозволило проаналізувати результати статистичного моделювання маршрутизації на спрощеній імітаційній моделі мережі зв'язку.

Публікації та апробація КР.

1. Уніченко П., Осадчук О., Черняк В. Критерії функціонування та надійність мультисервісної мережі зв'язку в умовах зовнішніх деструктивних впливів. Збірник матеріалів науково-практичного симпозиуму «Технології Інтернету речей: системи та рішення» (ТІР СТ - 2024), Тернопіль, 2024. С.77-78 [14].

2. Уніченко П., Драбик І. Математична модель розподілу інформації в умовах зовнішніх деструктивних впливів. Матеріали науково-практичного симпозиуму «Захист інформації». Тернопіль, 2024. С.85-88 [15].

1 ОГЛЯД ТА КЛАСИФІКАЦІЯ СУЧАСНИХ МЕТОДІВ МАРШРУТИЗАЦІЇ У МУЛЬТИСЕРВІСНИХ МЕРЕЖАХ ЗВ'ЯЗКУ

1.1 Основні терміни та узагальнена функціональна модель маршрутизації в мультисервісних мережах зв'язку

До основних термінів та визначень предметної області «Маршрутизація в мережах зв'язку» відносяться такі [16]:

- маршрут – список елементів мережі зв'язку (ВК, трактів передачі повідомлень (ТПП), каналів зв'язку (КЗ)), що починається з вузла-джерела (ВД) і закінчується у вузлі-одержувачі (ВО);

- маршрутизація - набір процедур, що дозволяють визначити та встановити оптимальне за заданими параметрами з'єднання мережі зв'язку між ВД і ВО.

У моделі взаємозв'язку відкритих систем (МВВС) функції маршрутизації покладено на третій – мережевий рівень. Даний рівень зручно подати у вигляді двох підрівнів. Протоколи, що беруть участь у другому підрівні, прийнято називати протоколами маршрутизації. Протоколи першого підрівня зазвичай називають протоколами сигналізації.

На другому підрівні проводиться моніторинг імовірно-часових характеристик (ІЧХ) елементів мережі зв'язку. Ця інформація є підставою для визначення маршрутів з потрібними ІЧХ між усіма ВК мережі зв'язку. Розраховані маршрути прописуються в таблицях маршрутизації (ТМ) у ранжованому порядку за перевагою вибору. У процесі функціонування мережі зв'язку ТМ використовують процедури першого підрівня для встановлення з'єднань між користувачами.

На практиці мережевий рівень реалізується у двох варіантах: з використанням лише протоколів маршрутизації; з використанням протоколів маршрутизації та сигналізації. У першому випадку використовуються технології, які не підтримують QoS програм [17]. У другому випадку – технології з попереднім встановленням з'єднань, які гарантують QoS, що є необхідною

умовою для мультисервісних мереж зв'язку (ММЗ) [18-20]. Тому надалі буде аналізуватися лише другий варіант.

Викликаючий користувач ініціює пакет виклику на встановлення з'єднання, який містить: адресу ВД; адресу ВП; один з R додатків, який братиме участь у передачі інформації користувача. Система сигналізації приймає цей пакет, звертається до ТМ ξ -го ($\xi = \overline{1, R}$) додатку, обирає перший у ранжованому списку маршрут, встановлює з'єднання між ВД та ВО (за наявності вільних КЗ із необхідними QoS). Інформація встановленого з'єднання фіксується у таблицях комутації (ТК), відповідних ВК. Це означає, що ММЗ виділила необхідні ресурси (КЗ, ТПП) для даного виклику і готова для передачі інформації користувача з необхідним QoS.

Якщо перший у списку ранжування маршрут не оступний, то вибирається наступний за перевагою маршрут. І так доти, доки маршрут не буде реалізований у вигляді з'єднання між парою користувачів. В іншому випадку користувачеві буде надано відмову в обслуговуванні. Після завершення передачі повідомлення інформація у ТК стирається.

Для того, щоб була можливість визначати маршрути між будь-якою парою ВК, необхідно побудувати ТМ у кожному ВК ММЗ. Сукупність ТМ називають планом розподілу інформації (ПРІ). Якщо в процесі експлуатації ММЗ відбувається корекція ПРІ, то такий метод формування ПРІ називають динамічним. В іншому випадку - статичним.

Насправді ТМ реалізуються в двох варіантах: покрокові ТМ і ТМ від джерела. Покрокова таблиця маршрутизації є матрицею:

$$M^{(j)} = \|m_{i,v}^{(j)}\|_{(S-1), H_j} = (\overline{m_1^{(j)}}, \dots, \overline{m_i^{(j)}}, \dots, \overline{m_{j-1}^{(j)}}, \overline{m_{j+1}^{(j)}}, \dots, \overline{m_S^{(j)}}); \quad (1.1)$$

$$\overline{m_i^{(j)}} = (\overline{m_{i1}^{(j)}}, \dots, \overline{m_{i,v}^{(j)}}, \dots, \overline{m_{iH_j}^{(j)}}) \quad v = \overline{1, H_j}; i, j = \overline{1, S}; i \neq j, \quad (1.2)$$

де S - кількість ДК у мережі;

H_j – кількість вихідних ТПГ із j -го ВК.

Матриця $M^{(j)}$ містить інформацію про перевагу вибору вихідного ТПП з j -го ВК під час пошуку маршруту до i -го вузла (ВП). Перший елемент $m_{i1}^{(j)}$ в (2) вказує номер вихідного ТПП з j -го ВК до суміжного ВК, який краще вибрати для організації маршруту до i -го ВК (ВП). Другий елемент $m_{i2}^{(j)}$ в (2) вказує номер наступного вихідного ТПП з j -го ВК до іншого суміжного ВК, який менш переважний для організації шуканого маршруту до i -го ВК. І так до H_j -го елемента вектор-рядка (2). При цьому кажуть, що $m_{i1}^{(j)}$ є вихідним ТПП першого вибору, $m_{i2}^{(j)}$ - вихідним ТПП другого вибору, і, відповідно, $m_{iH_j}^{(j)}$ - вихідним ТПС H_j -го вибору.

Таблиця маршрутизації від джерела є матрицею:

$$M^{(j)} = (\overline{\mu_1^{(j)}}, \dots, \overline{\mu_i^{(j)}}, \dots, \overline{\mu_{j-1}^{(j)}}, \overline{\mu_{j+1}^{(j)}}, \dots, \overline{\mu_S^{(j)}}); \quad (1.3)$$

$$\overline{\mu_i^{(j)}} = (\langle \overline{\mu_{i1}^{(j)}} \rangle, \dots, \langle \overline{\mu_{i\nu}^{(j)}} \rangle, \dots, \langle \overline{\mu_{iK_i}^{(j)}} \rangle), \nu = 1, K_i; i, j = \overline{1, S}; i \neq j, \quad (1.4)$$

де $\overline{\mu_i^{(j)}}$ – ранжований за перевагою список маршрутів із j -го ВД до i -го ВО;

$\langle \overline{\mu_{i,\nu}^{(j)}} \rangle$ - маршрут ν -го за перевагою вибору з j -го ВД до i -го ВО;

K_i – кількість маршрутів у ранжованому списку з j -го ВД до i -го ВО.

Таким чином, узагальнену функціональну модель маршрутизації в ММЗ можна подати такою, як на рисунку 1.1.

Основним продуктом рівня формування ПРІ є ТМ для кожної програми ММЗ. За ступенем централізації методи формування ПРІ класифікуються на централізовані, розподілені та комбіновані.

Рівень протоколів сигналізації, використовуючи методи вибору вихідних ТПП, по ТМ формує у всіх транзитних ВК, починаючи з ВД, таблиці комутації для кожної заявки встановлення з'єднання з необхідним QoS [21].

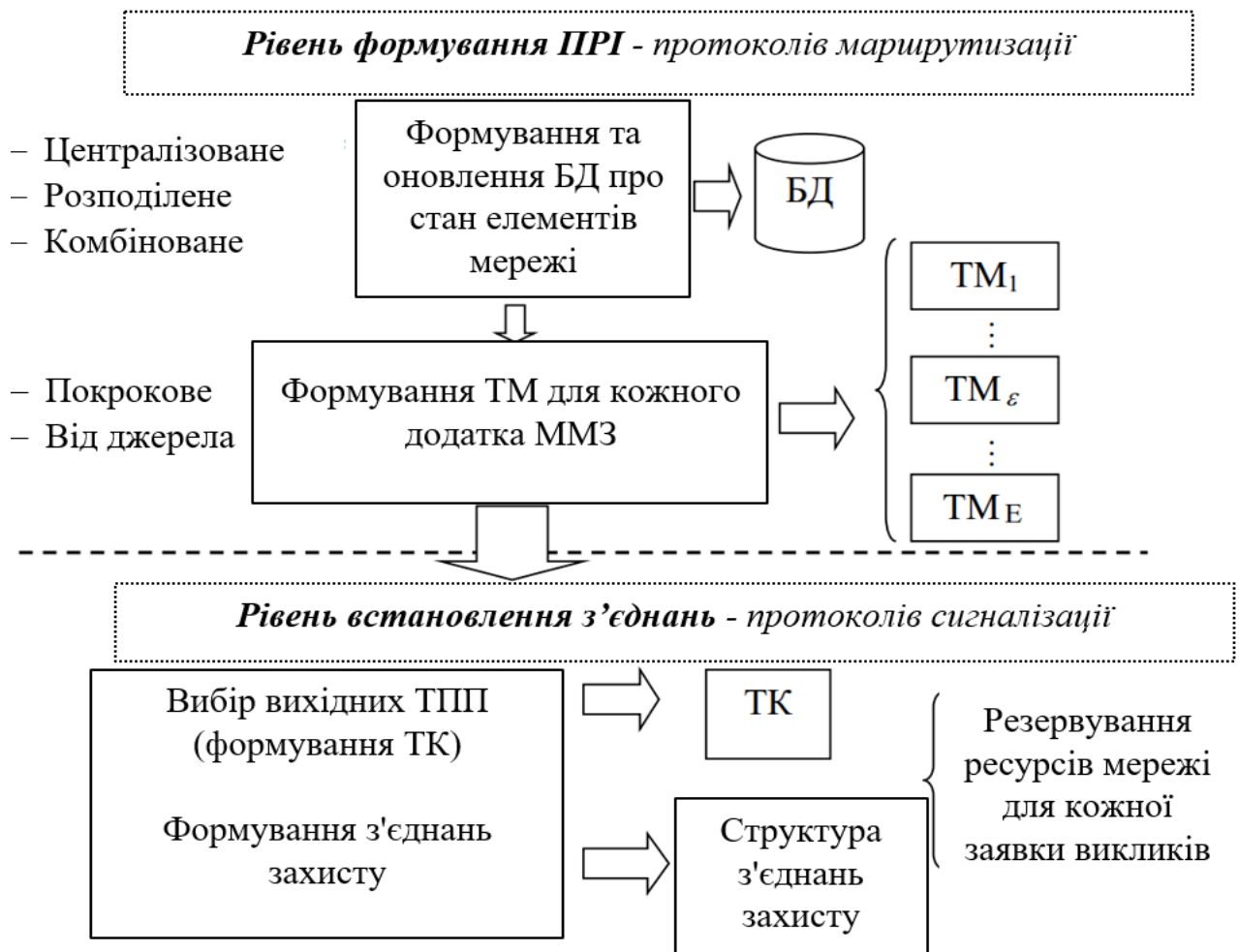


Рисунок 1.1 – Узагальнена модель функціонування маршрутизації в ММЗ

Передача повідомлень користувачів здійснюється за ТК, які сформовані на рівні протоколів сигналізації.

З наведеної узагальненої функціональної моделі випливає, що, комбінуючи незалежні методи формування ППР та вибору вихідних ТПП, можна реалізувати множину варіантів маршрутизації до ММЗ.

1.2 Огляд сучасних методів маршрутизації у мультисервісних мережах зв'язку

«Лавинний» метод для формування ППР (у вітчизняній літературі відомий як «Хвильовий», або «Рельєфів») на мережі полягає в наступному [22]. У кожному ВК через визначений час $\Delta t = \text{const}$ формуються зонд-сигнали, які

пересилаються до всіх інцидентних вузлів. У сусідніх ВК ця процедура повторюється. Таким чином, зонд-сигнали потрапляють у всі вузли ММЗ. У міру просування по мережі зонд-сигнали аналізують ІЧХ всіх елементів ММЗ. Зібрана інформація записується до бази даних (БД) ВК і використовується для розрахунку ТМ. Основним недоліком «лавинного» методу є необхідність виділення певного ресурсу мережі передачі зонд-сигналів.

Лавинний метод реалізований у технологіях АТМ та ІР всіх версій: RIP (Routing Information Protocol), IGRP (Interior Gateway Routing Protocol), EIGRP (Extended IGRP), IS-IS (Intermediate System – to – Intermediate System), OSPF (Open Shortest Path First) [23-24].

«Статистичний» метод (спочатку відомий як «Ігровий») передбачає формування ПРІ за накопиченою статистикою встановлення з'єднання між заданою парою ВК. Перед початком функціонування мережі встановлюється початковий ПРІ у вигляді набору ТМ (1.1) (для покрокової ТМ). Кожному значенню $m_{i,\nu}^{(j)}$, $\nu = 1, H_j; i, j = \overline{1, S}; i \neq j$ матриці (1/1) присвоюється ваговий коефіцієнт:

$$0 \leq p_{i,\nu}^{(j)} \leq 1; \nu = 1, H_j; i, j = \overline{1, S}; i \neq j, \quad (1.5)$$

причому

$$\overline{p_i^{(j)}} = \left(p_{i1}^{(j)}, \dots, p_{i\nu}^{(j)}, \dots, p_{iH_j}^{(j)} \right)_{\nu=1, H_j; i, j = \overline{1, S}; i \neq j}; \sum_{\nu=1}^{H_j} p_{i\nu}^{(j)} = 1. \quad (1.6)$$

В результаті формується матриця вагових коефіцієнтів:

$$p^{(j)} = \left\| p_{i,\nu}^{(j)} \right\|_{(S-1), H_j} = \left(\overline{p_1^{(j)}}, \dots, \overline{p_i^{(j)}}, \dots, \overline{p_{j-1}^{(j)}}, \overline{p_{j+1}^{(j)}}, \dots, \overline{p_S^{(j)}} \right), \quad (1.7)$$

де

$$\overline{p_i^{(j)}} = \left(p_{i1}^{(j)}, \dots, p_{i,v}^{(j)}, \dots, p_{H_j}^{(j)} \right)_{v=1, \overline{H_j}; i, j = 1, \overline{S}; i \neq j.} \quad (1.8)$$

Формування (корекція) ПРІ та визначення маршруту здійснюється наступним чином. У всіх транзитних ВК, починаючи з ВД, при пошуку маршруту до i -го ВО відбувається звернення до i -их рядків матриць маршрутизації (1.7). У i -их рядках (1.8) визначається максимальний ваговий коефіцієнт $p_{i,v}^{(j)}$. Тим самим вибирається v -ий вихідний ТПП з j -го ВК з організацією маршруту до i -го ВК. В результаті даних дій маршрут між заданою парою ВК буде або визначено, або даній заявці буде дано відмову в обслуговуванні.

У першому випадку, коли маршрут між заданою парою ВК визначено, всі ТПП, які входять в даний маршрут, заохочуються. Вагові коефіцієнти $p_{i,v}^{(j)}$ даних вихідних ТПП $m_{i,v}^{(j)}$ збільшуються. У другому випадку, коли маршрут не визначено, вихідні ТПП, які беруть участь у цьому пошуку, штрафуються. Вагові коефіцієнти $p_{i,v}^{(j)}$ даних вихідних ТПП зменшуються. В обох випадках рядки

$$\overline{p_i^{(j)}} = \left(p_{i1}^{(j)}, \dots, p_{i,v}^{(j)}, \dots, p_{H_j}^{(j)} \right)_{v=1, \overline{H_j}; i, j = 1, \overline{S}; i \neq j,} \quad (1.9)$$

елементи яких були змінені (заохочено або оштрафовано), нормуються. Таким чином, у процесі експлуатації ММЗ формується оптимальний ПРІ. Критерієм оптимальності є результат встановлення з'єднань у попередні моменти часу.

Якщо розглядати вагові коефіцієнти $p_{i,v}^{(j)}$ як ймовірності вибору відповідних вихідних ТПП $m_{i,v}^{(j)}$, то можна припустити, що «статистичний» метод формування ПРІ має ітеративний характер і вирішує задачу глобальної оптимізації ПРІ на мережі зв'язку за критерієм – можливість встановлення з'єднання між парами ВД та ВО.

Відсутність необхідності для передачі службової інформації для формування ПРІ на мережі є безперечною перевагою «статистичного» методу. Однак даний метод має інерційність. Дійсно, при виході елементів ММЗ з ладу потребується деякий період часу для переформування ПРІ. Іншим недоліком «ігрового» методу є невизначеність вибору початкового ПРІ у разі введення нових ВК в експлуатацію. Зазначимо, що даний метод реалізований у технології MPLS.

«Логічний» метод формування ПРІ на мережі зв'язку полягає в процедурі, яка виконується у кожному транзитному ВК, починаючи з ВД, що дозволяє визначити вихідний ТПП, максимально близький до геометричного напрямку пошуку на ВО. Для цього мережа зв'язку вкладається в систему координат (наприклад, прямокутну). Кожному вузлу мережі, у відповідності із системою координат (X, Y) присвоюється власна адреса. У кожному транзитному ВК (X_i, Y_j) , починаючи з ВД (X_R, Y_R) , розраховуються кути (рисунок 1.2):

- логічного напрямку пошуку на ВО пошуку $\alpha_{\text{пошуку}} = \arctg \frac{(Y_L - Y_R)}{(X_L - X_R)}$;
- вихідних ТПП $\alpha_1 = \arctg \frac{(Y_L - Y_{i1})}{(X_L - X_i)}$; $\alpha_2 = \arctg \frac{(Y_L - Y_{i2})}{(X_L - X_i)}$.

Потім визначається той вихідний ТПП, який має найбільший збіг коефіцієнтів α_1 (на прикладі рисунка 1.2) з раніше розрахованим $\alpha_{\text{пошуку}}$, а також геометричним напрямком для пошуку на ВО. Якщо найближчий, за напрямком ТПП, бкде недоступним, то підбирається черговий за перевагою α_2 вихідний ТПП.

Враховуючи, що в ММЗ вузли стаціонарні, то кути всіх вихідних ТПП можна розрахувати заздалегідь і зберігати в БД.

Безперечною перевагою даного методу є його простота, а також відсутність необхідності передачі службової інформації через мережу. У той же час, даний метод не є динамічним і не вирішує завдання глобальної оптимізації ПРІ.

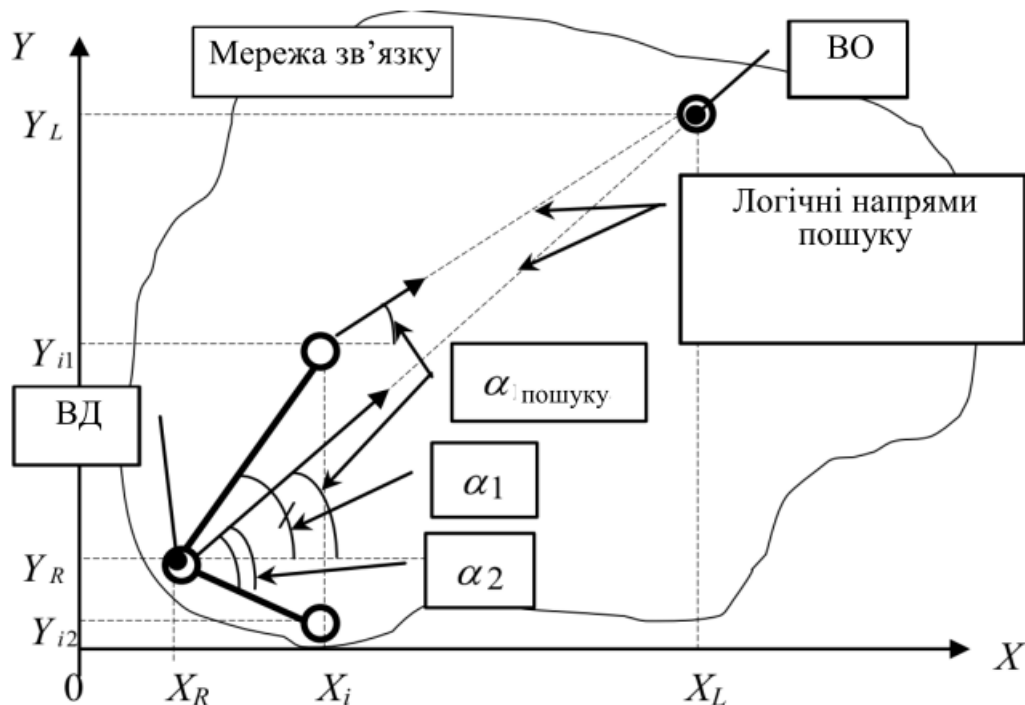


Рисунок 1.2 - Пошук маршруту логічним методом

1.3 Сучасні методи вибору вихідних трактів у вузлах комутації ММЗ

Залежно від характеру поширення на мережі процесу встановлення з'єднання між ВД та ВО виділимо три основні класи вибору вихідних ТПП: градієнтний, дифузний та градієнтно-дифузний.

Градієнтний метод полягає у тому, що у кожному транзитному вузлі, починаючи з ВД, у процесі вибору вихідного ТПП беруть участь в повному обсязі не всі вихідні ТПП, а лише їх частина (найбільш переважаючі). Якщо в одному із якихось ВК вихідні ТПП, які будуть брати участь у виборі, є недоступними, то тоді цій заявці дається відмова на формування маршруту.

В результаті градієнтного вибору з'єднання буде формуватися вздовж геометричного напрямку із ВД на ВО (рисунок 1.3). Збільшення вихідних ТПП, які можуть брати участь у виборі, призводить до можливого відхилення маршруту від геометричного напрямку із ВД на ВО, у тому числі й у бік, який протилежний від ВО. Вибір ТПП, при якому з'єднання формується і у бік, протилежний від ВО, називається дифузним. Отже, дифузний вибір вихідних

ТПП дає можливості для вибору будь-якого вихідного доступного ТПП. Градієнтно-дифузний метод є комбінацією двох перших.

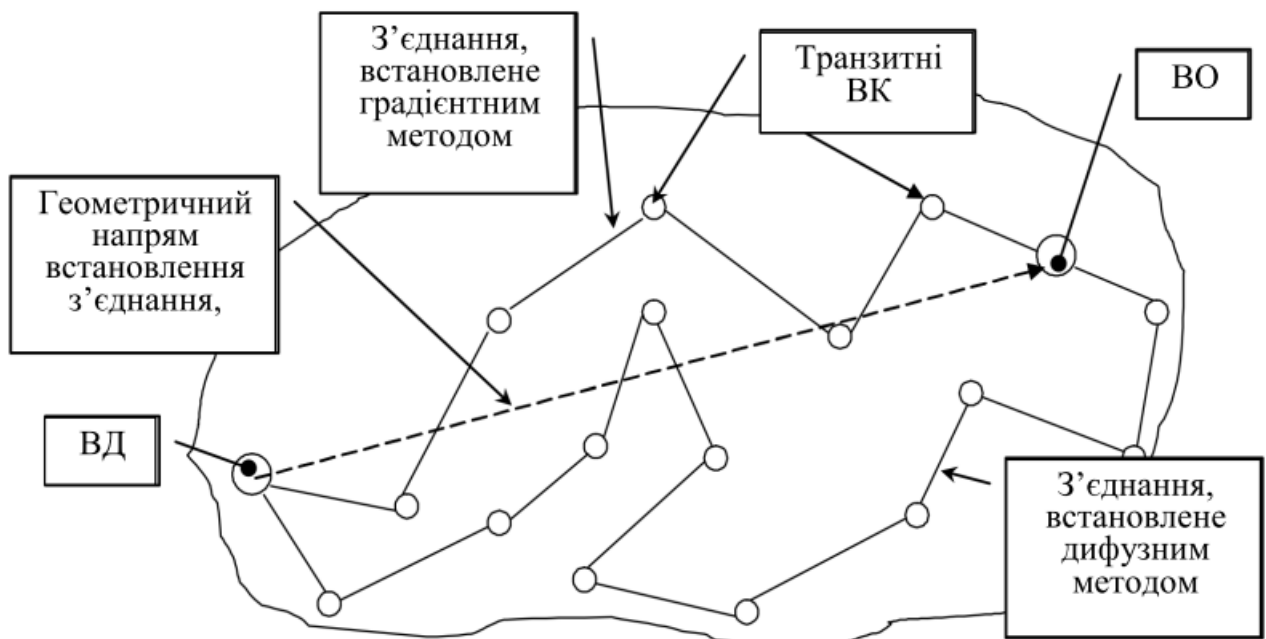


Рисунок 1.3 – Градієнтний і дифузний вибір вихідних ТПП

Реалізація градієнтних методів для вибору вихідних ТПП дозволяє організувати найкоротші з'єднання (по кількості транзитних ВК). Дифузні алгоритми володіють великою гнучкістю під час обходів пошкоджених ділянок у мережі, однак середня довжина маршруту у рівних із градієнтними умовами буде більшою.

У свою чергу, процедура для вибору вихідного ТПП в кожному із ВК може бути стохастичною та детермінованою. Вибір вихідного ТПП в першому випадку однозначно здійснюється за максимальним значенням одного із елементів векторів (1.2) або (1.4). В другому вибір вихідного ТПП проводиться у результаті випадкового розіграшу. Можливий і комбінований спосіб вибору вихідних ТПП, який містить як ймовірнісну, так детерміновану компоненти.

Незалежно від перерахованих градацій, вибір вихідних ТПП в ВК може бути послідовний, паралельний і послідовно-паралельний.

Послідовний вибір вихідних ТПП полягає у тому, що у кожному ВК, починаючи з ВД, здійснюється вибір лише одного вихідного ТПП. В результаті

на мережі формується одне з'єднання між ВД та ВО. Враховуючи перелічені градації, можна вказати множину варіантів послідовних алгоритмів вибору вихідних ТПП у ВК (наприклад, "Дифузний, ймовірнісний" або "Гradientно-дифузний, детермінований"). На сьогоднішній день із послідовних методів широке застосування знайшов «Дифузний, детермінований».

При паралельному виборі вихідних ТПП (англ. Multipath Routing) між ВД та ВО одночасно встановлюється кілька з'єднань. Такий підхід забезпечує збалансоване завантаження на ММЗ та сприяє підвищенню, насамперед, швидкісних і пов'язаних з ним ймовірнісно-часових характеристик QoS-додатків.

1.4 Класифікація методів маршрутизації у мережах зв'язку

Аналіз вищевикладеного матеріалу дозволяє дати нову класифікацію методам маршрутизації на мережах зв'язку (рисунок 1.4) [25]. Відмінна риса даної класифікації полягає в тому, що вона враховує незалежні процедури: формування плану розподілу інформації на мережі; вибір вихідних трактів, каналів зв'язку у ВК і дозволяє:

- провести цілеспрямований аналіз та синтез тих методів маршрутизації, які найбільш ефективно функціонуватимуть у передбачуваних мережах зв'язку та в заданих умовах;
- виявити множину варіантів реалізації як послідовних, так і паралельних (багатоколіїних) методів маршрутизації.

В результаті, комбінуючи відомі методи формування ПРІ та вибору вихідних ТПП можна отримати нові методи маршрутизації, що мають перспективу застосування у ММЗ. Наведемо приклади.

«Логіко-статистичний» метод є комбінацією «логічного» та «статистичного» методів формування ПРІ. В умовах функціонування ММЗ у «нормальних» умовах (відсутні зовнішні деструктуючі впливи на елементи мережі) формування ПРІ здійснюється «статистичним» методом. В умовах різкої зміни структури ММЗ (з якихось причин) застосовується «логічний» метод.

Маршрутизація

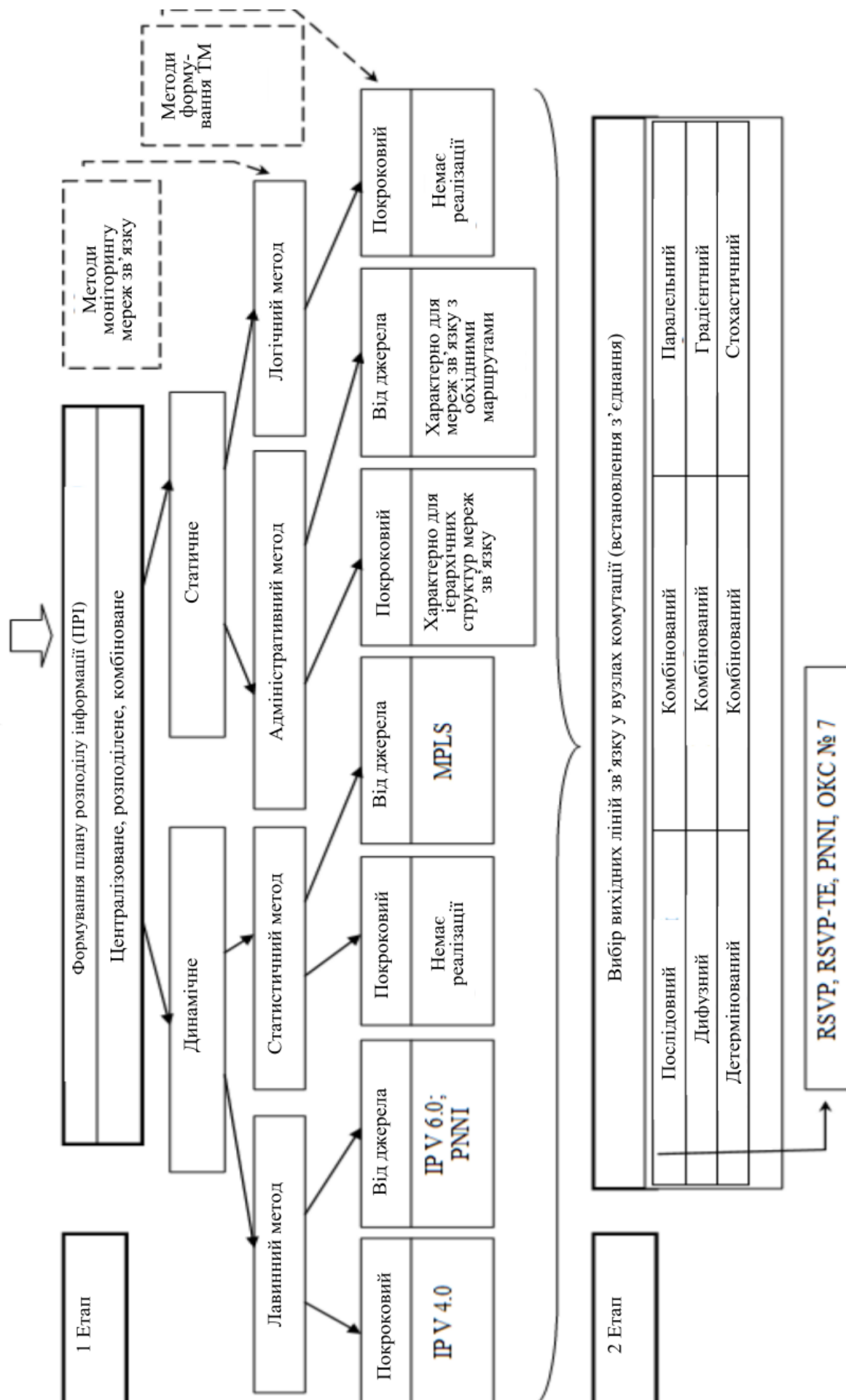


Рисунок 1.4 – Класифікація методів маршрутизації в мережах зв'язку

«Логіко-лавинний» метод є комбінацією «лавинного» та «логічного» методів і полягає в тому, що для встановлення оптимального з'єднання між парою вузлів з ВД організується «лавинний» пошук, але не у всіх напрямках, а лише у бік ВО. Хвиля пошуку при цьому поширюється в межах деякої зони у вигляді смуги, що охоплює ВД та ВО (рисунок 1.5). Ширина, форма смуги залежить від пріоритету користувача, стану елементів мережі, вимог додатків до QoS і може встановлюватися в різних межах. Зокрема, для користувачів нижчої категорії кількість обраних ТПП може не перевищувати одного, тоді пошук перетворюється на «чисто» послідовний.

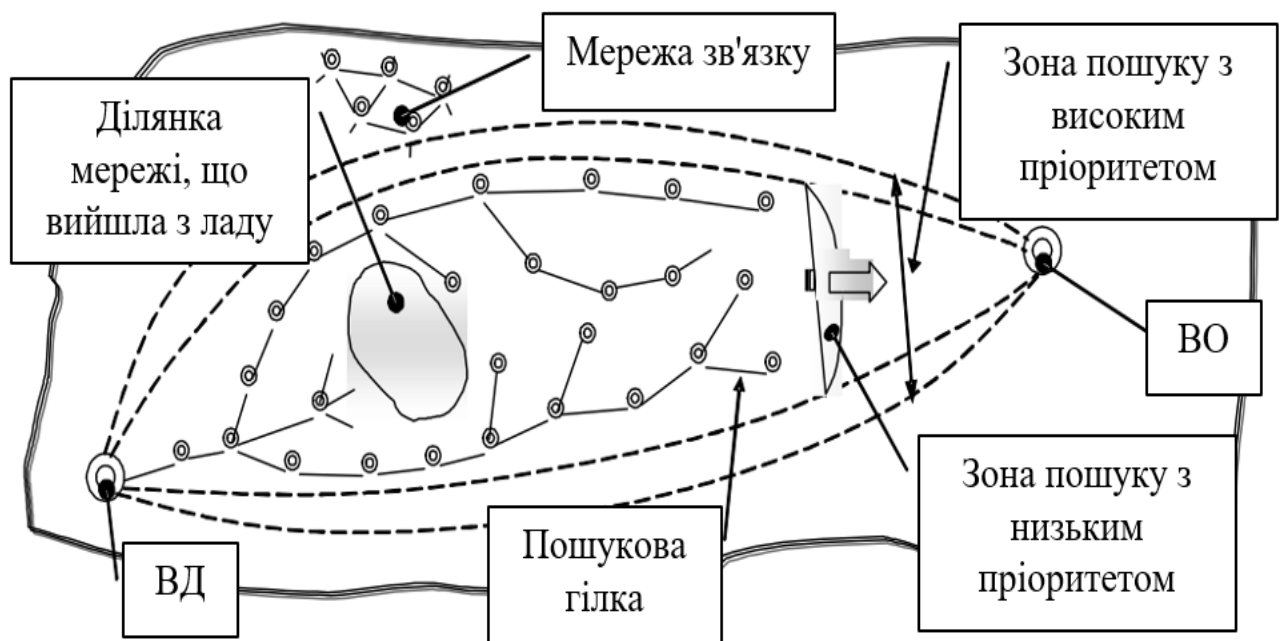


Рисунок 1.5 – Логіко-лавинний метод

«Логіко-лавинно-статистичний» метод є узагальненням «логічного», «лавинного» та «статистичного». Застосування одного з перерахованих методів залежить від умов функціонування ММЗ. У разі відсутності зовнішніх деструктуючих впливів на елементи мережі формування ПРІ здійснюється «статистичним» способом.

У разі різкої зміни структури ММЗ (з якихось причин) застосовується "логіко-лавинний" метод.

Отже, проведений аналіз сучасного стану маршрутизації в мультисервісних мережах зв'язку дозволив розробити нову класифікацію методів маршрутизації для мереж зв'язку. Відмінна особливість даної класифікації полягає в тому, що вона враховує незалежні процедури: формування плану розподілу інформації на мережі; вибір вихідних ліній, трактів, каналів зв'язку у вузлах комутації. Дана класифікація дозволяє:

- виявити множину варіантів реалізації як послідовних, так і паралельних (багатоколійних) методів маршрутизації (англ. Multipath Routing);
- провести цілеспрямований аналіз та синтез тих методів маршрутизації, які найбільш ефективно функціонуватимуть у передбачуваних мережах зв'язку та в заданих умовах.

1.5 Класифікація протоколів маршрутизації у бездротових мережах

Протоколи маршрутизації, що використовуються в бездротових мережах, ґрунтуються на традиційних алгоритмах маршрутизації, таких як дистанційно-векторний алгоритм та маршрутизація з урахуванням стану зв'язків. Однак обмежені ресурси бездротових мереж зробили проектування надійних та ефективних алгоритмів маршрутизації досить складним завданням, так як вони повинні не тільки ефективно використовувати ресурси, але і бути добре адаптовані до змін розміру мережі, сумісності бездротових пристроїв, щільності трафіку, до виведення вузлів із ладу тощо. На сьогоднішній день, виходячи зі специфіки побудови безпроводних мереж, їх високої динамічності та обмеженості ресурсів, що в цілому приведе до погіршення показників якості обслуговування, існує велика класифікація протоколів маршрутизації. І в залежності від ситуації, що склалася, реалізуються різні алгоритми маршрутизації, такі як проактивна та реактивна маршрутизація, маршрутизація залежно від географічного розташування, гібридна, ієрархічна тощо.

Але якщо проводити порівняльний аналіз найбільш використовуваних методів маршрутизації, то результати показують, що найбільш ефективними для

використання в бездротових мережах є реактивні протоколи, які ініціюють запит про формування (розрахунок) маршруту на вимогу. Такі протоколи зберігають пропускну здатність бездротового середовища та економлять запас енергії батарей мобільних терміналів. З іншого боку, для забезпечення якості обслуговування заслуговує уваги підхід, заснований на реалізації принципів багатокільцевої (multipath routing) та потоково-орієнтованої маршрутизації (flow-based routing).

Потоково-орієнтовані алгоритми маршрутизації можуть застосовуватися у високодинамічній мережі, в якій існує ряд вузлів, які менш рухливі, ніж усі решта. У такому разі трафік переважно обробляється цими малорухливими вузлами. Таким чином, може бути покращено знаходження маршруту і для реактивних, і для проактивних алгоритмів маршрутизації. Однак на початку роботи мережі такий підхід не дає хороших результатів, тому що немає ніяких раніше зібраних даних. Системі потрібен час для збирання необхідної статистики. Головна особливість, яка відрізняє протоколи потоково-орієнтованої маршрутизації від інших протоколів маршрутизації, це те, що дані протоколи підтримують множинні маршрути до кожного вузла, а не єдиний маршрут. А недоліком цього виду маршрутизації є великі часові витрати при встановленні кількох маршрутів.

Якщо розглядати бездротові мережі великої розмірності та з високою мобільністю вузлів, то проактивні алгоритми застосовуватися не можуть. Це пов'язано з великим обсягом службової інформації для підтримки маршрутів та повільною реакцією на зміну топології мережі. Однак їх можна взяти за основу для створення нових алгоритмів, більш пристосованих до мереж, що динамічно змінюються.

Спроба структурувати мережу, що динамічно змінюється, шляхом об'єднання вузлів у кластери на базі використання ієрархічної маршрутизації теж не принесла очікуваних результатів. Так як clusterheads (так звані, «головні вузли» в кластері) і шлюзи займаються маршрутизацією та координуванням. Вони легко можуть стати порівняно вузьким місцем мережі через те, що

навантаження на ці вузли буде набагато більше, ніж на звичайні, і це призведе до швидкого витрачання енергії та відключення цих пристроїв через нестачу енергії.

Гібридна маршрутизація має властивості як дистанційно-векторних алгоритмів маршрутизації, так і маршрутизації за станом каналів і, поєднуючи в собі переваги проактивної та реактивної маршрутизації, в цілому є більш ефективною.

Слід зазначити, що алгоритми та методи маршрутизації, що використовуються в бездротових мережах (FSR, OLSR, AODV та ін.) засновані переважно на моделях пошуку найкоротшого шляху на графовому поданні мережі. Ці моделі, як правило, не враховують можливість перевантаження радіоканалу, доступність смуги пропускання, обмеженість енергетичного ресурсу мережевого вузла. Незважаючи на широке розповсюдження графових моделей маршрутизації, покладених в основу більшості існуючих протоколів, що маршрутизують, на практиці все більш затребувані саме потокові моделі маршрутизації, які, з одного боку, враховують потоковий характер сучасного, переважно мультимедійного трафіку (відео, мова та ін.), а з іншого боку, більш адаптовані під вирішення задач.

В даний час існує безліч моделей, які використовуються в провідних мереж. В об'єднаних мережах завдання забезпечення QoS розглядають на макрорівні, тобто лише на рівні взаємодії складових локальних мереж. Мережева структура на макрорівні змінюється відносно рідко, що так само дозволяє використовувати відомі методи.

Однак у бездротових мережах маршрутизація та забезпечення необхідного QoS ґрунтуються на динамічній природі цих мереж, що визначає використання динамічних алгоритмів забезпечення QoS. Існуючі моделі QoS неприйнятні для використання в мобільних мережах Ad Hoc та необхідна їх адаптація для використання у таких мережах.

Виходячи з цього, незважаючи на різноманітність протоколів та алгоритмів маршрутизації в бездротових мережах, жоден з них не є

самодостатнім. Тому в цьому випадку виникає завдання розробки та дослідження деяких нових підходів для розв'язання задачі маршрутизації в бездротових мережах, що підвищують ефективність передачі даних із забезпеченням необхідного для різних встановлених додатків рівня якості обслуговування.

Таким чином, до протоколів маршрутизації в бездротових мережах сформульовані спеціальні вимоги (рисунок 1.6).



Рисунок 1.6 – Вимоги до протоколів маршрутизації в сучасних безпроводних мережах

Отже, на даному етапі розвитку бездротових мереж в силу ряду переваг найбільш використовуваними вважаються такі види маршрутизації: реактивна, проактивна та ієрархічна.

Однак у бездротових мережах маршрутизація та забезпечення необхідного QoS ґрунтуються на динамічній природі цих мереж, що визначає використання динамічних алгоритмів забезпечення QoS. Виходячи з цього, були висунуті вимоги для вдосконалення існуючих та розроблення нових протоколів маршрутизації.

2 РОЗРОБЛЕННЯ МОДЕЛЕЙ МАРШРТИЗАЦІЇ В МУЛЬТИСЕРВІСНІЙ МЕРЕЖІ ЗВ'ЯЗКУ В УМОВАХ ЗОВНІШНІХ ДЕСТРУКТИВНИХ ВПЛИВІВ

2.1 Математична модель впливу методів формування плану розподілу інформації на обсяг доступних мережевих ресурсів

Спектр методів маршрутизації, які можна застосувати на мережах зв'язку, дуже широкий - від найпростіших, фіксованих процедур, до дуже складних (рисунок 1.4). Кожен з них має свої переваги та недоліки.

Вибір методу маршрутизації значною мірою впливає на ефективність використання ресурсів мережі та якість обслуговування програм, доступних користувачам. Водночас проведення натурних досліджень на діючих мережах пов'язано з суттєвими технічними, організаційними та фінансовими труднощами. Тому як інструментарій для аналізу впливу маршрутизації на QoS додатків мультисервісної мережі зв'язку застосовують імітаційне та математичне моделювання.

На сьогодні як математичний апарат використовують теорію графів, теорію масового обслуговування, теорію ланцюгів Маркова, теорію нечітких множин, теорію нейронних мереж, теорію ігор, мережі Петрі тощо. Застосування такого широкого діапазону математичних підходів обумовлено складністю та специфікою предмета аналізу. Завдання дослідження методів маршрутизації особливо ускладнюється в умовах зовнішніх деструктивних впливів на елементи мультисервісних мереж зв'язку.

Представимо структуру мультисервісної мережі зв'язку у вигляді неорієнтованого графа $G[A_S, M_S]$ з такими множинами: вершин $A_S = \{a_i\}$, $i=1, 2, \dots, S$, відповідних ВК; ребер $M_S = \{m_{ij}\}$, $i, j=1, 2, \dots, S$, $i \neq j$, відповідних ЛЗ.

Нехай кожна ЛЗ має середню пропускну здатність за час спостереження T :

$$r_{ij} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T r_{ij}(t) dt; i, j = \overline{1, S}; i \neq j \text{ [біт/с]}, \quad (2.1)$$

яку називатимемо ресурсом ЛЗ.

Очевидно, що загальний середній мережевий ресурс ММЗ визначатиметься виразом:

$$R_0 = \sum_{i,j=1;i \neq j}^S r_{ij} \text{ [біт/с]}. \quad (2.2)$$

У мультисервісній мережі зв'язку відмова у встановленні з'єднання виникає при недоступності користувацьких мережевих ресурсів, що гарантують QoS вибраних додатків. Тому представляє інтерес проведення досліджень впливу методів маршрутизації ROUT на доступність користувацьких мережевих ресурсів в умовах зовнішнього деструктивного впливу $\Psi_{-}(t)$:

$$R_n = f(R_0, \Psi_{-}(t), ROUT). \quad (2.3)$$

Наведена малюнку 1.5 класифікація методів маршрутизації показує, що сучасні мережеві технології ATM, IP, MPLS тощо використовують «Послідовний, дифузний, детермінований» метод вибору вихідних ТПП (протоколи сигналізації). При цьому в ATM, IP (всіх версій) застосовується «Лавинний» метод формування плану розподілу інформації, а MPLS – «Статистичний» метод. Тому для аналізу функціоналу (2.3) оберемо:

- методи формування плану розподілу інформації (протоколи маршрутизації): $ROUT_{TM}^{(лав)}$ - "Лавинний" (від джерела); $ROUT_{TM}^{(stat)}$ - "Статистичний" (від джерела);
- $ROUT_{cc}$ - метод вибору вихідних ТПП (протоколи сигналізації) – "Послідовний, дифузний, детермінований".

Навантаження на мережеві елементи, створюване маршрутизацією, $ROUT = \{ROUT_{TM} \uparrow ROUT_{cc}\}$, залежить від багатьох факторів:

- зовнішніх деструктивних впливів на елементи ММЗ;
- частоти спроб встановлення з'єднань між ВД та ВО;

- методів вибору вихідних ТПП (протоколів сигналізації);
- методів формування плану розподілу інформації (протоколів маршрутизації) та багатьох інших.

Можна припустити, що процес використання мережевих ресурсів, необхідних для реалізації аналізованих методів маршрутизації в ММЗ, має нелінійну залежність і в загальному випадку підпорядковується поліноміальному закону:

$$R^{(ROUT)} = a_n x^n + a_{n-1} x^{n-1} + \dots + a_1 x + a_0, \quad (2.4)$$

де $a_i, i=1, 2, \dots, n$ - коефіцієнти, значення яких залежить від застосування методу маршрутизації на мережі зв'язку;

$0 \leq x \leq 1$ – змінна, яка визначає ступінь недоступності загальних мережевих ресурсів ММЗ та має наступний фізичний зміст:

1) впливає на величину середніх мережевих ресурсів, необхідних для організації маршрутизації. Справді, якщо:

$$\begin{cases} x = 0, \text{ то використовуються мінімальні мережеві ресурси при процедурі ROUT;} \\ x = 1, \text{ то використовуються максимальні мережеві ресурси при процедурі ROUT;} \end{cases}$$

2) визначає частину мережевих ресурсів, які схильні до зовнішніх деструктивних впливів $\Psi_-(t)$. У цьому випадку середні мережеві ресурси, які залишилися після дії $\Psi_-(t)$ на ММЗ, визначаються виразом:

$$R'_0 = (1 - x) \cdot R_0 = (1 - x) \sum_{i,j=1; i \neq j}^S r_{ij} \text{ [біт/с]}. \quad (2.5)$$

Очевидно, що середні мережеві ресурси доступні для передачі користувальницької інформації, що визначаються виразом:

$$R_{II} = R_0' - R^{(ROUT)} \text{ [біт/с]}. \quad (2.6)$$

Визначимо значення коефіцієнтів a_i ; $i=1, 2, \dots, n$ для різних методів маршрутизації. Припустимо, що для реалізації кожного з аналізованих методів маршрутизації ММЗ генерується за одиницю часу блок даних B бітів.

При «Лавинному» методі формування плану розподілу інформації $ROUT^{(лав)}$ кожен ВК генерує через рівні інтервали часу $\Delta t = \text{const}$ зонд-сигнали шляхом широкомовного розсилання K блоків даних розміром B .

Отже, середні мережеві ресурси, необхідні для організації «Лавинного» методу формування ПРІ, визначаються виразом:

$$R^{(лав)} = a_0 = \frac{K \cdot B \cdot S}{\Delta t}. \quad (2.7)$$

Тоді вираз (2.6) з урахуванням (2.5) для «Лавинного» методу формування ПРІ набуде вигляду:

$$R_n^{(лав)} = (1-x) \cdot R_0 - \frac{K \cdot B \cdot S}{\Delta t}. \quad (2.8)$$

або у відносному вираженні:

$$R_{n \text{ відн}}^{(лав)} = (1-x) \cdot R_0 - \frac{K \cdot B \cdot S}{\Delta t} = 1-x-a_0'. \quad (2.9)$$

$$\text{де } a_0' = \frac{K \cdot B \cdot S}{\Delta t \cdot R_0}.$$

При «Статистичному» методі $ROUT^{(стат)}$ коригування таблиць маршрутизації відбувається під час спроби встановлення з'єднань. Отже, за аналогією з виведенням виразу (2.9), отримаємо:

$$R_n^{(ctam)} = (1-x) - \sum_{i=0}^n a_i^{(ctam)} \cdot x^i; \quad (2.10)$$

$$R_{n \text{ відн}}^{(ctam)} = (1-x) - \frac{(a_n \cdot x^n + a_{n-1} \cdot x^{n-1} + \dots + a_1 \cdot x + a_0)}{R_0} = 1-x - \sum_{i=0}^n a_i'^{(ctam)} \cdot x^i, \quad (2.11)$$

$$\text{де } a_i' = \frac{a_i}{R_0}; i = \overline{0, n}.$$

Обмежимося лише одним членом отриманого ряду, тобто отримаємо підвищену оцінку для «Статистичного» методу формування ПРІ:

$$R_{n \text{ відн}}^{(ctam)} = 1-x - a_1' \cdot x. \quad (2.12)$$

Проведемо аналіз виразів (2.9), (2.12). На рисунках 2.1 та 2.2 наведено графіки залежностей (2.9), (2.12) за зміни коефіцієнтів a_0' a_1' . Тут $R_{n \text{ відн}}^{(ROUT)}$, $R_{0 \text{ відн}}'$ та $R_{0 \text{ відн}}$ - значення відповідних величин щодо R_0 .

Аналіз даних залежностей дозволяє зробити такі висновки:

1) при виконанні умови

$$x = \frac{a_0'}{a_1'} \quad (2.13)$$

існує зона ($x \approx 0,2 \div 0,4$), в межах якої обидва методи формування ПРІ використовують однакові середні мережеві ресурси;

2) у разі, якщо

$$x < \frac{a_0'}{a_1'}, \quad (2.14)$$

тобто значення ступеня недоступності загальних мережевих ресурсів ММЗ знаходиться в межах $0 \leq x \leq (0,2 \div 0,4)$, «Статистичний» метод формування ПРІ використовує менше мережевих ресурсів, ніж "Лавинний";

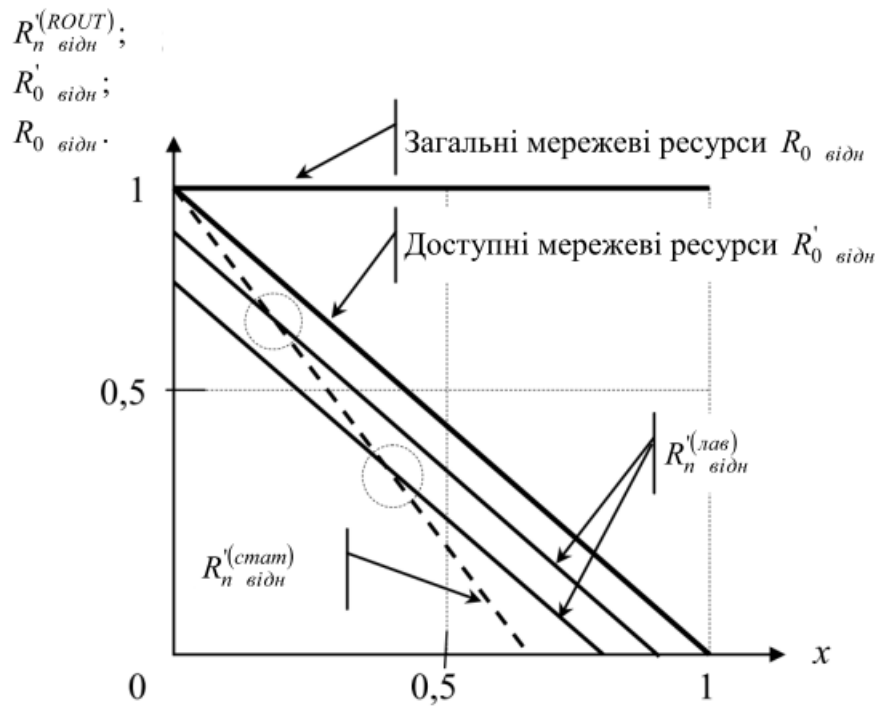


Рисунок 2.1 – Залежності середніх мережевих ресурсів від ступеня недоступності загальних мережевих ресурсів ММЗ x для «Лавинних» методів формування ПРІ

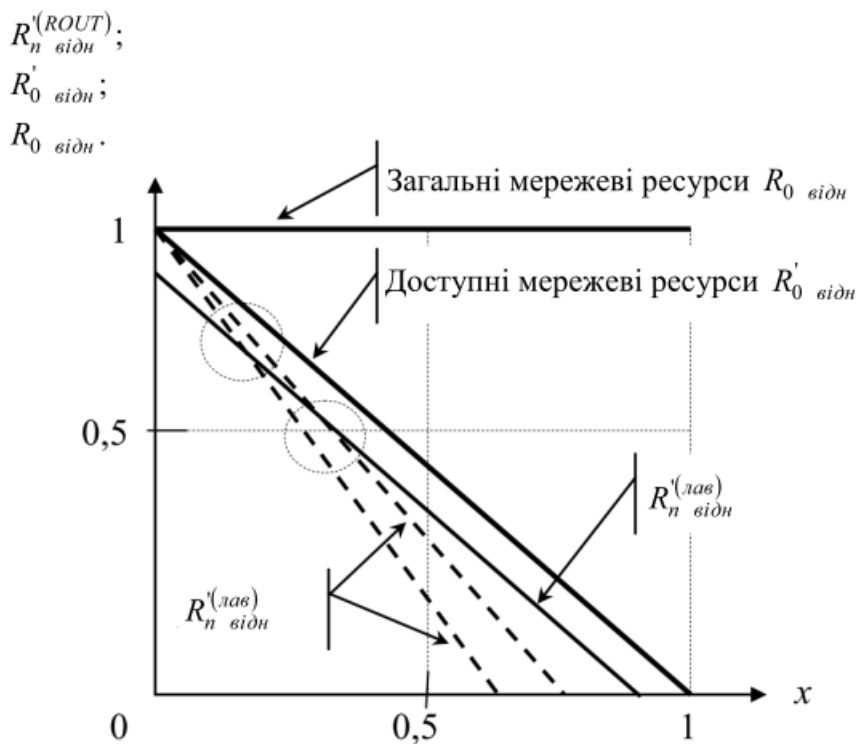


Рисунок 2.2 – Залежності середніх мережевих ресурсів від ступеня недоступності загальних мережевих ресурсів ММЗ x для «Статистичних» методів формування ПРІ

3) зі збільшенням ступеня недоступності загальних мережевих ресурсів ММЗ x від $(0,2 \div 0,4)$ до 1 «Статистичний» метод формування ПРІ дає найгірші результати, порівняно з "Лавинним" методом;

4) в умовах зовнішнього деструктивного впливу Ψ_t , при якому приблизно 30% мережевих ресурсів виходить з ладу, доцільно застосовувати «Лавинні» методи формування ПРІ.

Наведемо приклад оцінки обсягу користувацьких мережевих ресурсів R_n (2.3), доступних користувачам для різних методів формування ПРІ при умовах зовнішньої деструктивної дії Ψ_t .

Припустимо, що під час спостереження T мережу зв'язку, що містить $S=100$ ВК, має такі середні параметри:

- блок даних $B=8 \cdot 1000$ біт;
- кожен ВК генерує $K=100$ блоків даних маршрутною інформацією;
- загальний мережевий ресурс (сумарна пропускна спроможність усіх каналів зв'язку) дорівнює $R_0=10$ Мбіт/с;
- інтервал генерації маршрутною інформації (зонд-сигналів) у мережі «Лавинним» методом формування ПРІ дорівнює $\Delta t=30$ с;
- сигнальна інформація, що генерується «Статистичним» методом формування ПРІ, підпорядковується лінійному закону з постійними коефіцієнтами $a_0=0$ та $a_1=20$ Мбіт/с (PPS на мережі задається адміністратором мережі вручну).

Оцінимо обсяг користувацьких мережевих ресурсів R_n (2.3), доступних користувачам для різних методів формування ПРІ в умовах зовнішньої деструктивної дії Ψ_t (при ступені недоступності загальних мережевих ресурсів ММЗ $x=0,1$ і $x=0,5$).

Для «лавинного» методу формування ПРІ, відповідно до (2.8), складе:

- за умови $x=0,1$

$$R_n^{(lav)} = (1-x) \cdot R_0 - \frac{K \cdot B \cdot S}{\Delta t} = (1-0,1) \cdot 10^7 - \frac{100 \cdot 1000 \cdot 8 \cdot 100}{30} = 6,33 \text{ Мбіт/с};$$

- якщо $x=0,5$

$$R_n^{(лав)} = (1-x) \cdot R_0 - \frac{K \cdot B \cdot S}{\Delta t} = (1-0,5) \cdot 10^7 - \frac{100 \cdot 1000 \cdot 8 \cdot 100}{30} = 2,33 \text{ Мбіт/с.}$$

Обсяг користувацьких мережевих ресурсів R_n із застосуванням "Статистичного" методу формування ПРІ (2.10) в залежності від ступеня недоступності загальних мережевих ресурсів ММЗ:

- при $x = 0,1$:

$$R_n^{(стат)} = (1-x)R_0 - a_1x = (1-0,1) \cdot 10^7 - 0,1 \cdot 20 = 7 \text{ Мбіт/с};$$

- при $x = 0,5$:

$$R_n^{(стат)} = (1-x)R_0 - a_1x = (1-0,5) \cdot 10^7 - 0,5 \cdot 20 = -5 \text{ Мбіт/с}.$$

Знак мінус означає, що за ступеня недоступності загальних мережевих ресурсів ММЗ $x=0,5$ обсяг середніх мережевих ресурсів, необхідних для організації процедури маршрутизації «Статистичним» методом, перевищує загальний обсяг мережевих ресурсів мережі (користувацькі мережеві ресурси відсутні). Це призводить до відмови передачі інформації користувача. При цьому «Лавинний» метод формування ПРІ забезпечує передачу користувацької інформації.

2.2 Розробка математичної моделі маршрутизації за умов вхідного самоподібного трафіку та зовнішніх деструктивних впливів на елементи мультисервісної мережі зв'язку

На рисунку 2.3 представлена концепція математичної моделі порівняльного аналізу маршрутизації в мультисервісній мережі зв'язку.

Вихідними даними є:

- структура мультисервісної мережі зв'язку з множиною ВК та ЛЗ;
- метод маршрутизації;
- асинхронний потік пакетів різних додатків, що входить до ММЗ, доступних користувачам;
- ступінь тяжіння вузлів-джерел до вузлів-отримувачів для передачі пакетів повідомлень ε-го додатку ММЗ;

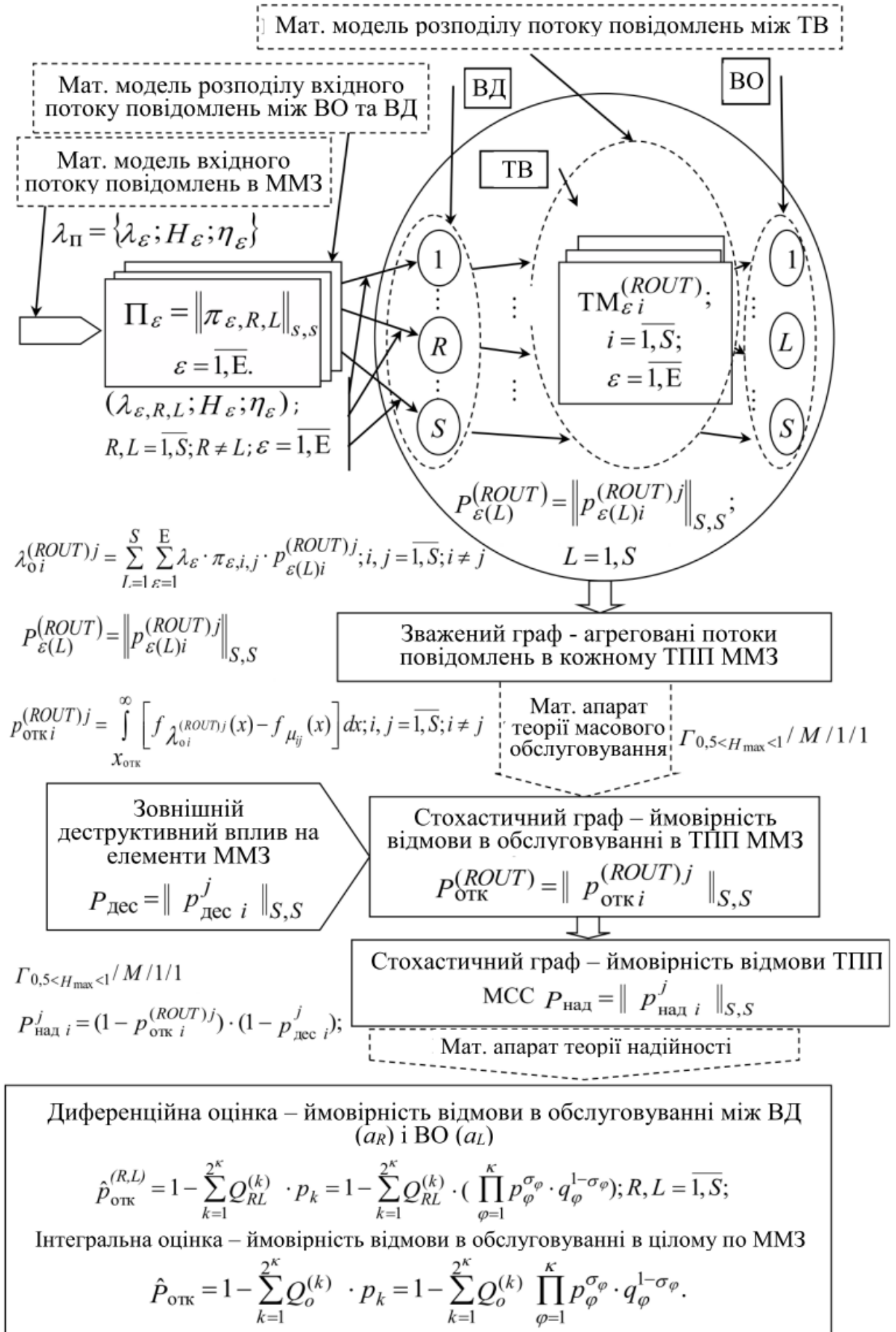


Рисунок 2.3 – Концепція математичної моделі маршрутизації в ММЗ

- зовнішній деструктивний вплив на елементи мультисервісної мережі зв'язку.

Кожен додаток ММЗ характеризується імовірісно-часовими характеристиками (швидкість передачі, час затримки, часовий джиттер, ймовірність помилкового прийому на символ, пакет, повідомлення та багато інших). Не підтримання даних параметрів (з боку ММЗ) призводить до відмови в обслуговуванні цих додатків, отже, до зниження QoS мультисервісної мережі зв'язку [26-27]. У зв'язку з цим узагальнюючим параметром якості функціонування ММЗ приймемо ймовірність відмови в обслуговуванні обраних користувачами програм.

Таким чином, критеріями функціонування ММЗ можна вважати:

- ймовірність відмови в обслуговуванні в цілому по мультисервісній мережі зв'язку – інтегральна оцінка;

- ймовірність відмови в обслуговуванні між кожною парою вузол-джерело та вузол-одержувач у мультисервісній мережі зв'язку – диференціальна оцінка.

Порядок визначення ймовірностей наступний. Інформаційний потік пакетів повідомлень, що входить до ММЗ ε -го додатку відповідно до ступеня тяжіння вузлів-джерел до вузлів-одержувачів дезагрегується на окремі потоки, які надходять у відповідні ВД для подальшої передачі у відповідних ВО.

У кожному тракті передачі повідомлень формуються віртуальні канали (ВК) та віртуальні тракти (ВТ) передачі повідомлень. Це означає, що на канальному рівні ММЗ у трактах передачі повідомлень формується асинхронний потік пакетів) (P_i) (рисунок 2.4).

Підкоряючись наперед визначеній процедурі маршрутизації, потоки повідомлень різних додатків у кожному ВК (ВД та транзитних вузлах (ТВ)) розподіляються на всіх трактах передачі повідомлень ММЗ. Далі, агрегуючи розподілені потоки повідомлень у кожному тракті, визначається сумарний потік кожного тракту передачі повідомлень ММЗ. Враховуючи, що ТПП володіє певною пропускнуою здатністю, то з'являється можливість застосувати апарат теорії масового обслуговування А саме, визначити ймовірність відмови в

обслуговуванні потоку повідомлень, що агрегується, в кожному тракті ММЗ. У результаті отримуємо стохастичний граф, ребрам якого присвоєно ймовірності відмови обслуговування додатків ММЗ.

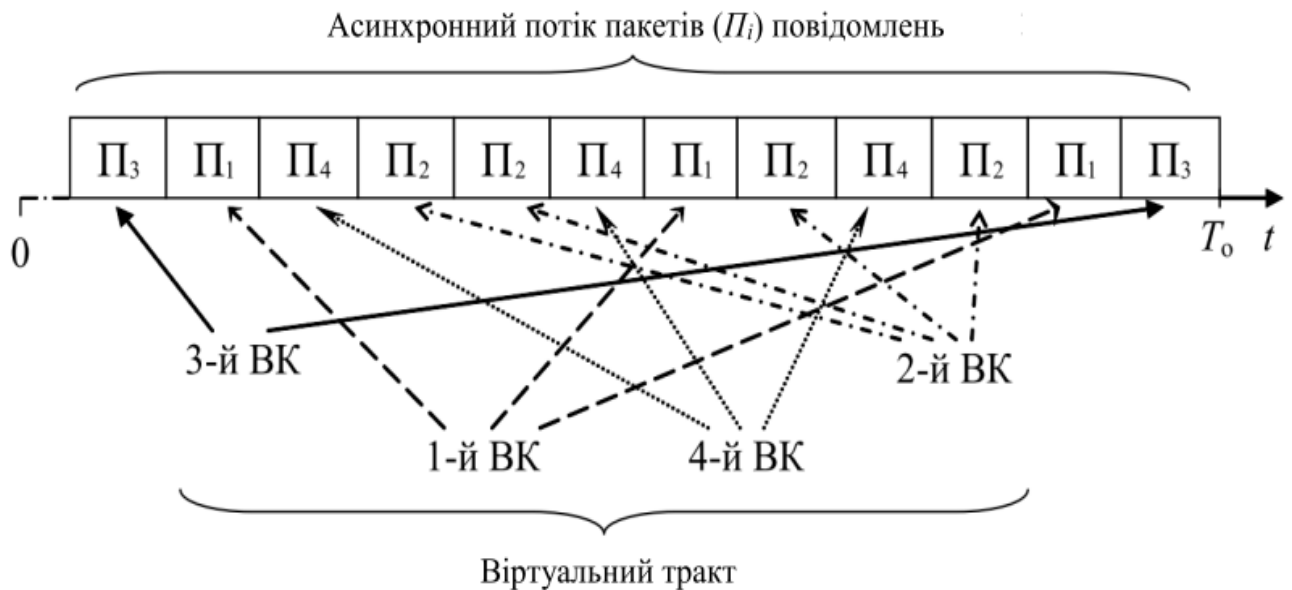


Рисунок 2.4 - Приклад формування ВК в одному ВТ за час спостереження

Зовнішній деструктивний вплив реалізується у заздалегідь заданих ймовірностях відмови ТПП мультисервісної мережі зв'язку. Якщо припустити, що ймовірності відмови обслуговування додатків ММЗ у кожному ТПП та ймовірності відмови самих ТПП (внаслідок зовнішніх деструктивних впливів) є незалежними подіями, то дані ймовірності перемножуються. В результаті отримується новий стохастичний граф, ребрам якого надано ймовірності їх відмови.

Далі, використовуючи математичний апарат теорії надійностей, є можливість розрахунку значень, що шукаються:

- ймовірність відмови в обслуговуванні в цілому по мультисервісній мережі зв'язки - інтегральна оцінка;
- ймовірність відмови в обслуговуванні між кожною парою вузол-джерело та вузол-одержувач у мультисервісній мережі зв'язку – диференціальна оцінка.

Таким чином, змінюючи:

- основні параметри ММЗ (структуру, пропускні здібності ТПП);

- імовірісно-часові параметри (інтенсивність надходження, щільність розподілу) інформаційного потоку пакетів, що входить до ММЗ повідомлень ε-го додатку;

- параметри зовнішнього деструктивного впливу на ММЗ (ймовірності виходу ТПС з ладу)

є можливість провести порівняльний аналіз функціонування різних методів маршрутизації до ММЗ.

2.3 Аналіз та розробка методів перевірки графа мережі на зв'язність

При оцінці структурної надійності мережі зв'язку у кожному випробуванні статистичного моделювання виконується процедура перевірки графа на зв'язність, на яку витрачається основний час від загального обсягу роботи. Таким чином, скорочення часу на величину $\Delta\tau_{ce}$ для перевірки графа на зв'язність в одному випробуванні дає скорочення часу на оцінку структурної надійності мережі зв'язку на $(N_0 \cdot \Delta\tau_{ce})$.

Проведемо порівняльний аналіз відомих методів перевірки графа на зв'язність з позицій їх обчислювальної складності.

Метод «Розростання» полягає у наступному. На графі вибирається довільна вершина. По черзі виписуються суміжні вершини. Виписуються нові вершини, які з'єднані ребрами хоча б із однією з вже виписаних вершин. Якщо після закінчення зазначеної процедури залишилися не виписані деякі вершини, то це і вказує на незв'язність аналізованого графа.

У методі «Пошук у глибину», за аналогією з методом «Розростання», у першому етапі вибирається довільна вершина. Далі вибирається ребро, що з'єднує цю вершину з суміжною. Вершини (спочатку обрана і суміжна) та ребро запам'ятовуються. У суміжній вершині процедура вибору ребра повторюється. При цьому ставиться умова: вибір ребра, по якому пошук прийшов у цю вершину, здійснюється останнім. Насамперед вибирається будь-яке з ребер, що з'єднують раніше непереглянуті вершини. Таким чином, «Пошук у глибину»

послідовно проходить по всіх ребрах двічі, потрапляє у всі можливі вершини і повертається у вибрану спочатку вершину. Після закінчення процедури «Пошук у глибину» виробляють порівняння числа переглянутих вершин з реальним числом вершин аналізованого графа. Якщо числа збігаються, то граф зв'язний. В іншому разі граф незв'язний.

Метод «Згортки» полягає в тому, що виконують одночасне "З'єднання" суміжних вершин до довільно обраної вершини до тих пір, поки граф не представиться у вигляді «Одиночної» вершини (якщо граф зв'язний, рисунок 2.5) або множини вершин (граф незв'язний, рисунок 2.6).

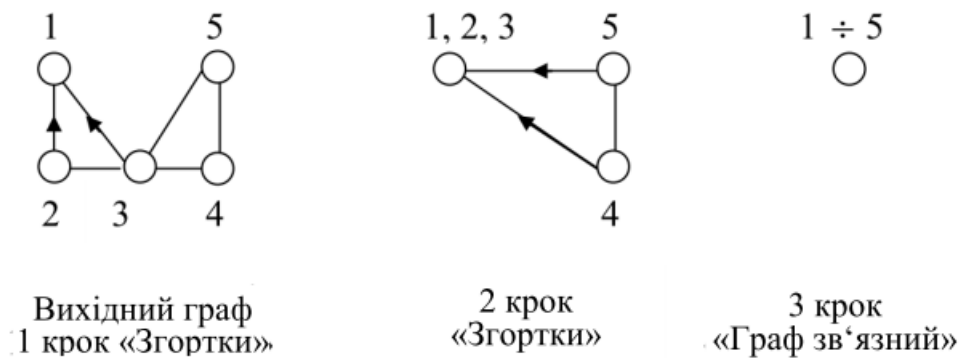


Рисунок 2.5 – Приклад перевірки зв'язного графа методом «Згортки»

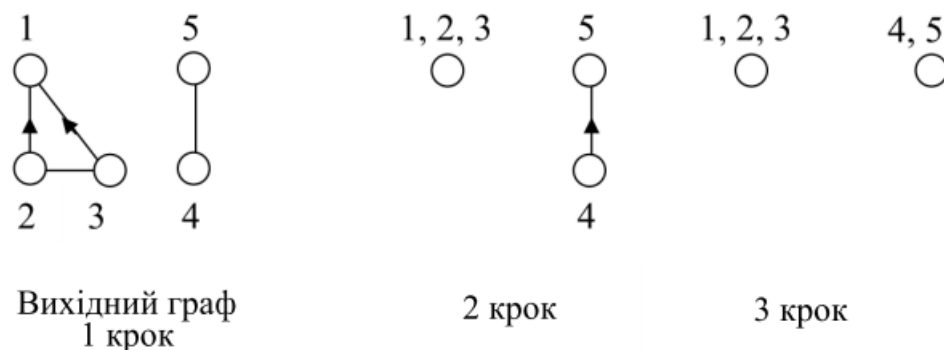


Рисунок 2.6 – Приклад перевірки незв'язного графа методом «Згортки»

Метод «Розбиття» полягає в тому, що аналізований граф розбивають на підграфи, кожен із яких окремо перевіряють на зв'язність методом «Згортка». В результаті одержують новий граф – "Суперграф", який у свою чергу перевіряють

на зв'язність. Якщо «Суперграф» зв'язний, то роблять висновок, що вихідний граф зв'язний. В іншому випадку вважають, що граф незв'язний.

У таблиці 2.1 зведено результати порівняльного аналізу обчислювальної складності різних методів перевірки графа на складність.

Таблиця 2.1 - Обчислювальна складність методів перевірки графа на зв'язність

№	Метод перевірки графа на зв'язність	Обчислювальна складність
1	Пошук в глибину	$Q_{gl} = f(\chi \cdot S^3)$
2	Розростання	$Q_{poz} = f(A \cdot S^2)$
3	Згортка	$Q_{zg} = f(\chi \cdot S \cdot (\sqrt{S} - 1))$
4	Розбиття	$Q_{roz} = f(\chi \cdot (S + \sqrt{S}) \cdot (\sqrt[4]{S} - 1))$

В формулах таблиці використано такі позначення: χ - кількість вихідних трактів передачі повідомлень, S - кількість вузлів комутації, A - коефіцієнт в алгоритмі.

Знайдемо відношення обчислювальної складності методу «Згортки» до методу «Розбиття»:

$$\frac{\chi \cdot S \cdot (\sqrt{S} - 1)}{\chi \cdot (S + \sqrt{S}) \cdot (\sqrt[4]{S} - 1)} \approx \sqrt{S}. \quad (2.15)$$

Таким чином, за рахунок розбиття вихідного графа на підграфи з'являється можливість працювати на пологій ділянці кривої, що відображає часову залежність перевірки графа на зв'язність від розмірності графа.

Тим самим метод «Згортки» у порівнянні з відомими методами має в S разів меншу алгоритмічну складність. На рисунку 2.7 наведено гістограму відносного часового виграшу перевірки графа мережі на зв'язність методом «Розбиття» стосовно методу «Згортки». Тут T_{zg} та T_{roz} відповідно час перевірки

графа мережі на зв'язність методом «Згортки» та запропонованого методу «Розбиття». Результати отримані на графі комірчастої структури зі ступенем кожної вершини графа, рівним 4.

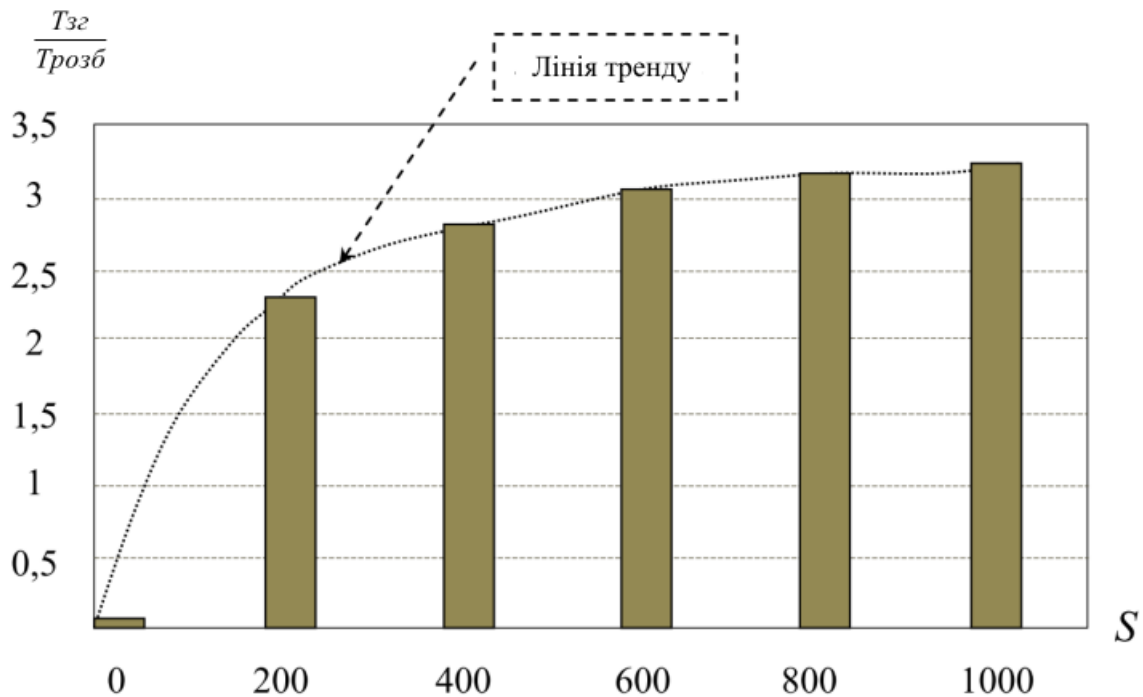


Рисунок 2.7 - Гістограма відносного часового виграшу перевірки графа мережі на зв'язність методом «Розбиття» стосовно методу «Згортки»

2.4 Розробка методики визначення плану розподілу інформації на однорідній комірчастій мережі зв'язку великої розмірності

При аналізі методів маршрутизації на мережах довільного зв'язку структури, що мають кілька десятків вузлів комутації, виникають проблеми, пов'язані з розв'язанням задач великої розмірності. Це пояснюється тим, що обчислювальна складність алгоритмів, що реалізують той чи інший метод маршрутизації, має як мінімум, кубічну залежність від кількості ВК на мережі зв'язку.

У тих випадках, коли структура мережі зв'язку набуває деякої регулярності, що характерно для комірчастих мереж зв'язку, представляється можливим уявити її у вигляді регулярної правильної решітки. Результати,

отримані на таких структурах, можуть дати асимптотичні оцінки для аналізу методів маршрутизації та значно зменшити складність алгоритмів, які моделюють ці методи.

Виберемо для аналізу методів маршрутизації комірчасту однорідну структуру мережі зв'язку з квадратною коміркою.

Вкладемо граф $G[A_S, M_S]$, що описує структуру мережі, в прямокутну систему координат так, щоб координати вершин графа приймали лише позитивні цілі числа з кроком, що дорівнює одиниці. Тоді кожна вершина a_i графа $G[A_S, M_S]$ матиме свою адресу з координатами $\{i, j\}$.

Вихідну вершину графа, що відповідає ВД аналізованої мережі зв'язку, помістимо на початок координат і далі розглядатимемо процедуру знаходження маршруту між будь-якою вершиною графа $G[A_S, M_S]$ та вихідної.

Нехай β_{ij} визначає число найкоротших (за кількістю проміжних вершин) маршрутів між вихідною вершиною з координатами $\{0, 0\}$ та вершиною $\{i, j\}$; $i=1, 2, \dots, x_{max}$; $j=1, 2, \dots, y_{max}$, де x_{max} та y_{max} - максимальна кількість ВК по осях X та Y відповідно.

Величину β_{ij} будемо присвоювати вершині з координатами $\{i, j\}$, маючи при цьому на увазі, що вона відноситься до пари ВК з координатами $\{0, 0\}$, $\{i, j\}$. Очевидно, що для однорідної комірчастої мережі зв'язку з квадратною коміркою величини β_{ij} і β_{ji} рівні між собою. Усі вершини графа $G[A_S, M_S]$ по відношенню до вершини $\{i, j\}$ розділятимемо на два підмножини A_1 і A_2 .

У підмножину A_1 входять ті вузли, які не виходять за межі встановленого прямокутника аналізованої мережі зв'язку, обмеженого вершинами з координатами: $\{i, j\}$; $\{i, 0\}$; $\{0, 0\}$ та $\{0, j\}$ (рисунок 2.8).

Справедливо наступне твердження: кількість найкоротших маршрутів β_{ij} між вихідною вершиною з координатами $\{0, 0\}$ та вершиною з координатами $\{i, j\}$ визначається тільки вершинами, що входять до підмножини A_1 .

Таким чином, для вибору кращого напрямку в ВК по числу найкоротших маршрутів з цього ВК, досить зіставити між собою координати цього вузла і продовжити пошук маршруту за напрямом координати X або Y .

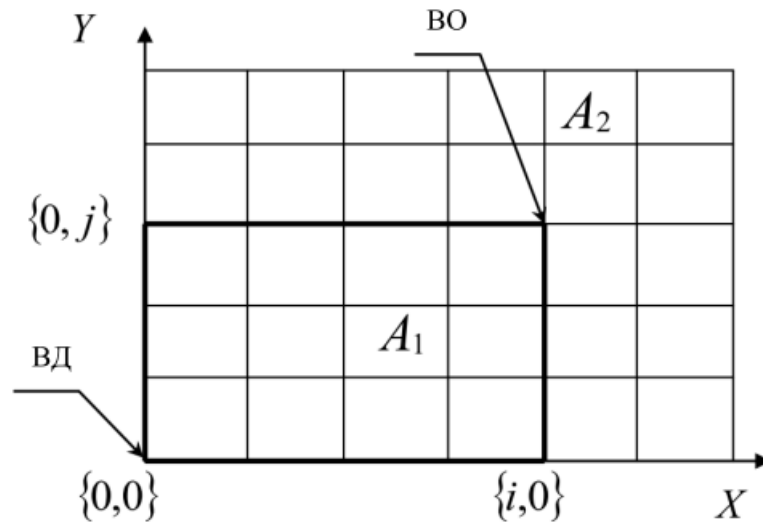


Рисунок 2.8 – Визначення числа найкоротших маршрутів між ВД та ВО

Отже, використовуючи прості розрахунки у кожному КК, можна послідовно будувати маршрут від ВД до ВО.

«Гradientний ймовірно-детермінований послідовний метод з логічним формуванням плану розподілу інформації» передбачає встановлення маршрутів між парою ВД та ВО з мінімальною кількістю транзитних ВК. У разі відсутності маршрутів з мінімальною кількістю транзитних ВК заявка, що надійшла на обслуговування від користувача ВД, отримує відмову. Вибір ТПП у кожному ВК здійснюється детерміновано.

На рисунку 2.9 а) наведений приклад встановлення з'єднання між ВД і ВО з координатами, відповідно, $\{2, 2\}$ і $\{5, 6\}$. На рисунку 2.9 б) показана спроба організації маршруту між вузлами з координатами $\{7, 2\}$ і $\{2, 4\}$.

ВК, що вийшли з ладу, не дають можливості встановити маршрут з мінімальним числом трактів управління між ВД та ВО (хоча найкоротший маршрут існує), тому заявка, що надійшла від користувача ВД, отримує відмову в обслуговуванні.

Особливістю ММЗ є підтримка параметрів програм QoS. У зв'язку з цим необхідно враховувати ВВХ трактів передачі повідомлень (пропускна здатність, швидкість передачі пакетів, час затримки, часовий джиттер, ймовірність помилкового прийому на символ, пакет і т.д.), що беруть участь у формуванні маршрутів між ВД та ВО.

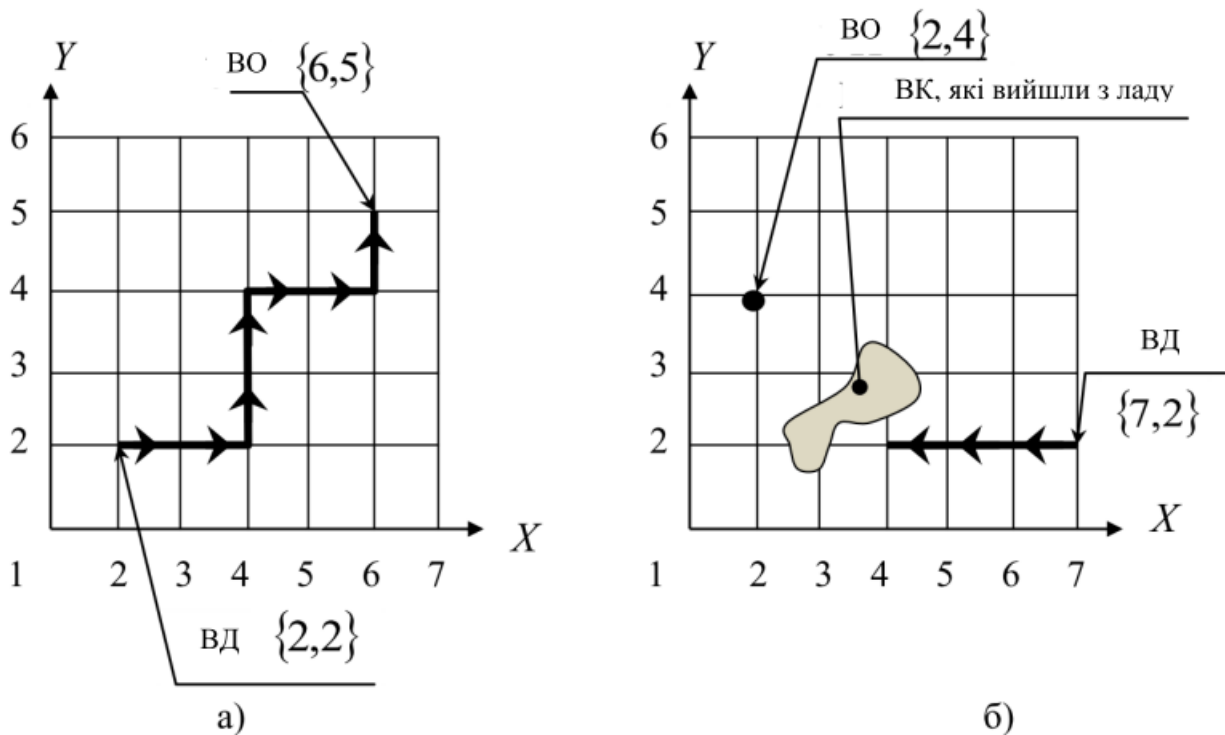


Рисунок 2.9 – Градієнтний ймовірно-детермінований послідовний метод маршрутизації з логічним формуванням плану розподілу інформації

«Дифузний без повернення назад ймовірно-детермінований послідовний з логічним формуванням плану розподілу інформації» метод маршрутизації дозволяє організувати маршрут між ВД та ВО з необмеженим числом транзитних ВК. Однак максимальна кількість вибору вихідних ТПП до УК не перевищує трьох. Маршрут від ВД до ВО шукається по всіх напрямках крім тих, що:

- ведуть у протилежний бік від ВО;
- при даному пошуку раніше було пройдено.

Таким чином, процедура пошуку маршруту даним методом полягає в послідовному виконанні операцій у всіх транзитних ВК, починаючи з ВД.

Якщо обчислений напрямок доступний, то відповідний вихідний ТПП підключається до раніше вибраного маршруту. В іншому випадку обчислюється переважаючий напрямок. Якщо й у цьому разі вихідний ТПП недоступний, то цій заявці дається відмова в обслуговуванні. Обчислені напрямки не повинні прокладати маршрут у протилежний бік від ВО та брати участь при цьому пошуку маршруту більше одного разу.

На рисунку 2.10 а) наведено приклад встановлення маршруту даним методом між ВД та ВО з координатами $\{2, 5\}$ і $\{6, 3\}$. На рисунку 2.10 б) показано спробу організації маршруту між вузлами з координатами $\{7, 5\}$ і $\{2, 4\}$. ВК, що вийшли з ладу, не дають можливості встановити маршрут, внаслідок чого заявка, що надійшла від користувача ВД, отримує відмову в обслуговуванні.

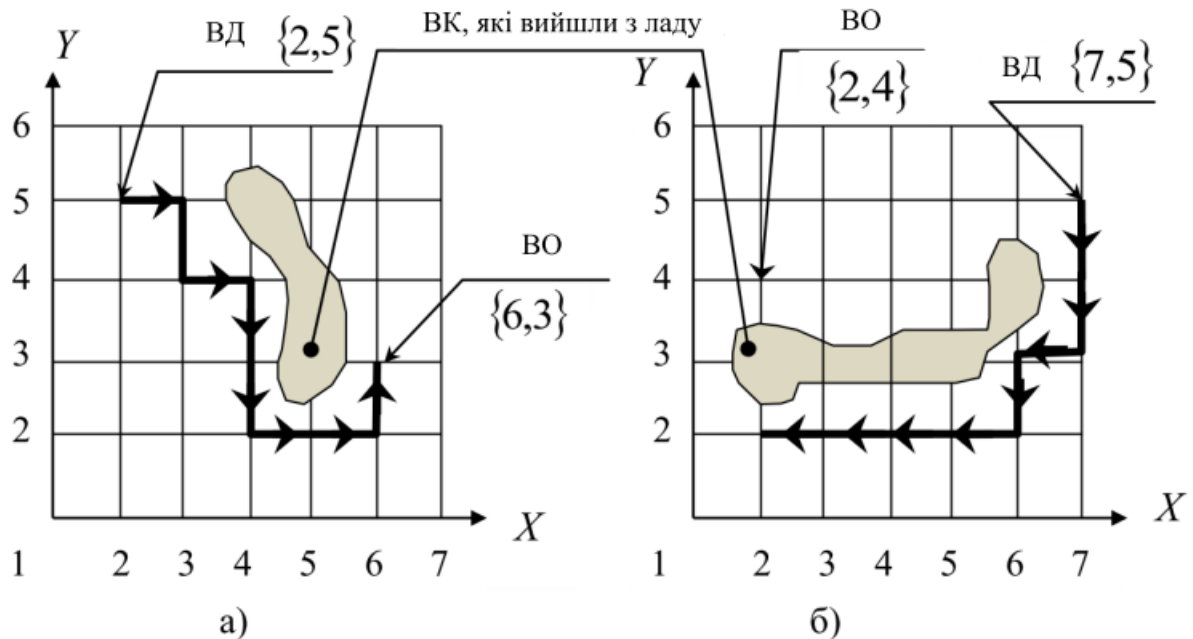


Рисунок 2.10 – «Дифузний без повернення назад імовірно-детермінований послідовний з логічним формуванням плану розподілу інформації» метод маршрутизації

«Дифузний ймовірно-детермінований послідовний з логічним формуванням плану розподілу інформації» метод маршрутизації дозволяє організувати маршрут між ВД та ВО з необмеженою кількістю транзитних ВК. Обчислюється найкращий напрямок (один із чотирьох) за кількістю найкоротших маршрутів. Якщо вибраний напрямок доступний, то він підключається до раніше набраного маршруту. В іншому випадку обчислюється новий, менш переважаючий напрямок. Дана процедура повторюється доти, доки знайдеться доступний вихідний ТПП. Якщо ж доступні вихідні ТПП у всіх напрямках відсутні, то заявці, що надійшла від користувача, надається відмова в обслуговуванні.

На рисунку 2.11 наведено приклад організації маршруту між ВД та ВО з координатами $\{3, 3\}$ і $\{6, 2\}$ відповідно.

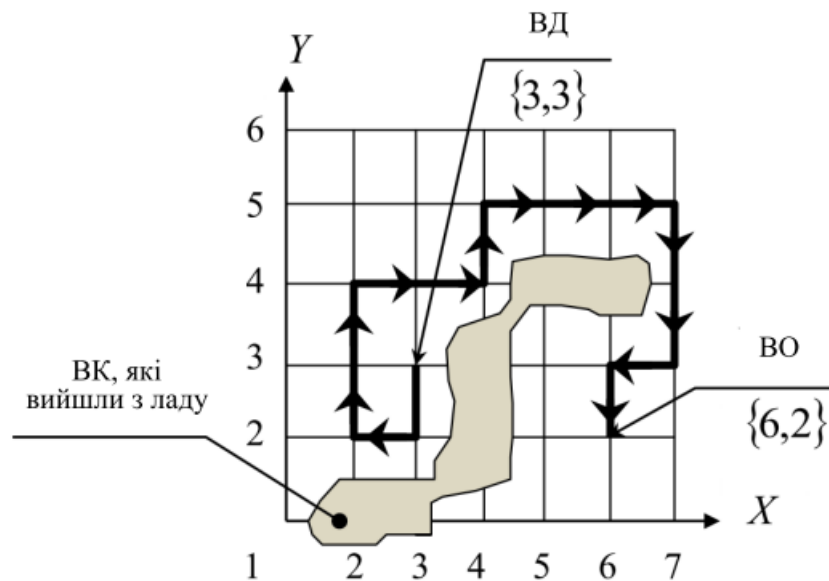


Рисунок 2.11 – Приклад організації «Дифузного імовірісно-детермінованого послідовного з логічним формуванням плану розподілу інформації» метод маршрутизації

Розрахунок елементів матриці імовірнісних переходів здійснюється за аналогією з «Дифузним без повернення назад імовірісно-детермінованим послідовним з логічним формуванням плану розподілу інформації» методом маршрутизації. Однак у цьому випадку враховуються всі 4 напрямки пошуку маршруту.

3 АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ МОДЕЛЮВАННЯ МАРШРУТИЗАЦІЇ В УМОВАХ ЗОВНІШНІХ ДЕСТРУКТИВНИХ ВПЛИВІВ НА ЕЛЕМЕНТИ МУЛЬТИСЕРВІСНОЇ МЕРЕЖІ ЗВ'ЯЗКУ

3.1 Імітаційне моделювання мультисервісної мережі зв'язку в умовах обмежених мережевих ресурсів

Протоколи мережевого рівня мають значний вплив на параметри QoS додатків мультисервісних мереж зв'язку [28-]. Цей факт стимулює розробників телекомунікаційного обладнання до дослідження, реалізації та впровадження нових, більш досконалих програмно-апаратних комплексів, які здійснюють процедури маршрутизації. Разом з тим такі комплекси є структуроутворюючими для ММЗ.

Це означає, що впровадження нових методів маршрутизації завжди тягне за собою досить серйозні матеріальні витрати та проведення глобальних організаційно-технічних заходів на діючих мережах. Бажано мати універсальні комплекси, що реалізують процедури маршрутизації, здатні підтримувати будь-які технології формування пакетів інформації користувача (ATM, IP всіх версій, Ethernet тощо) [30].

В результаті було розроблено протокол MPLS, який реалізує "Статистичний" метод формування ПРІ. Застосування MPLS спільно з іншими мережевими технологіями (ATM, IP усіх версій, Ethernet тощо) забезпечує QoS необмеженого спектра додатків і не потребує значних матеріальних витрат на діючих ММЗ.

«Статистичний» метод формування ПРІ організує маршрут по накопиченій статистиці раніше встановлених з'єднань. Це є пеєрвагою даного методу та водночас серйозним недоліком. Можна припустити, що в умовах зовнішніх деструктивних впливів на елементи ММЗ через відсутність статистичної інформації даний метод буде не ефективно вирішувати задачі процедур маршрутизації.

Дані міркування підтверджує результат, який стверджує, що в умовах зовнішнього деструктивного впливу, за якого приблизно 30% мережевих ресурсів мультисервісної мережі зв'язку виходить з ладу, доцільно застосовувати «Лавинний» метод формування плану розподілу інформації в порівнянні зі «Статистичним».

У зв'язку з цим представляє надзвичайний інтерес проведення спеціального додаткового дослідження даного результату на мережах зв'язку з різною структурою з використанням різних математичних та імітаційних моделей.

Існує досить багато програмних продуктів для моделювання мереж зв'язку: COMNETIII виробник CACI Products Company; OPNET від компанії OPNET Technologies; NetCracker XA; OMNET++; NS2; NS3 (The Network Simulator); CPN (Colored Petri Nets) і багато інших. При цьому важливими критеріями вибору того чи іншого програмного продукту є:

- зручний графічний інтерфейс;
 - можливість варіювання параметрів моделювання під час проведення експериментів;
 - ціна програмного продукту
- та багато інших критеріїв, необхідних для аналізу мережевих процесів телекомунікаційних систем.

Скористайтеся спеціалізованим програмним продуктом Opnet Modeler v 14.0. Даний програмний продукт призначений для імітаційного моделювання мереж зв'язку; містить велику бібліотеку програмно-апаратних комплексів (маршрутизаторів, комутаторів, маршрутизованих комутаторів різних рівнів і т.д.), що реалізують відомі на ринку телекомунікацій мережеві технології та протоколи.

Для імітаційного моделювання обрано характерну для мультисервісної мережі «Комірчасту» структуру (рисунок 3.1). У її складі міститься 5 локальних мереж зв'язку (Lan), 10 маршрутизаторів (Router1 ÷ Router10) та один сервер (Server_1).

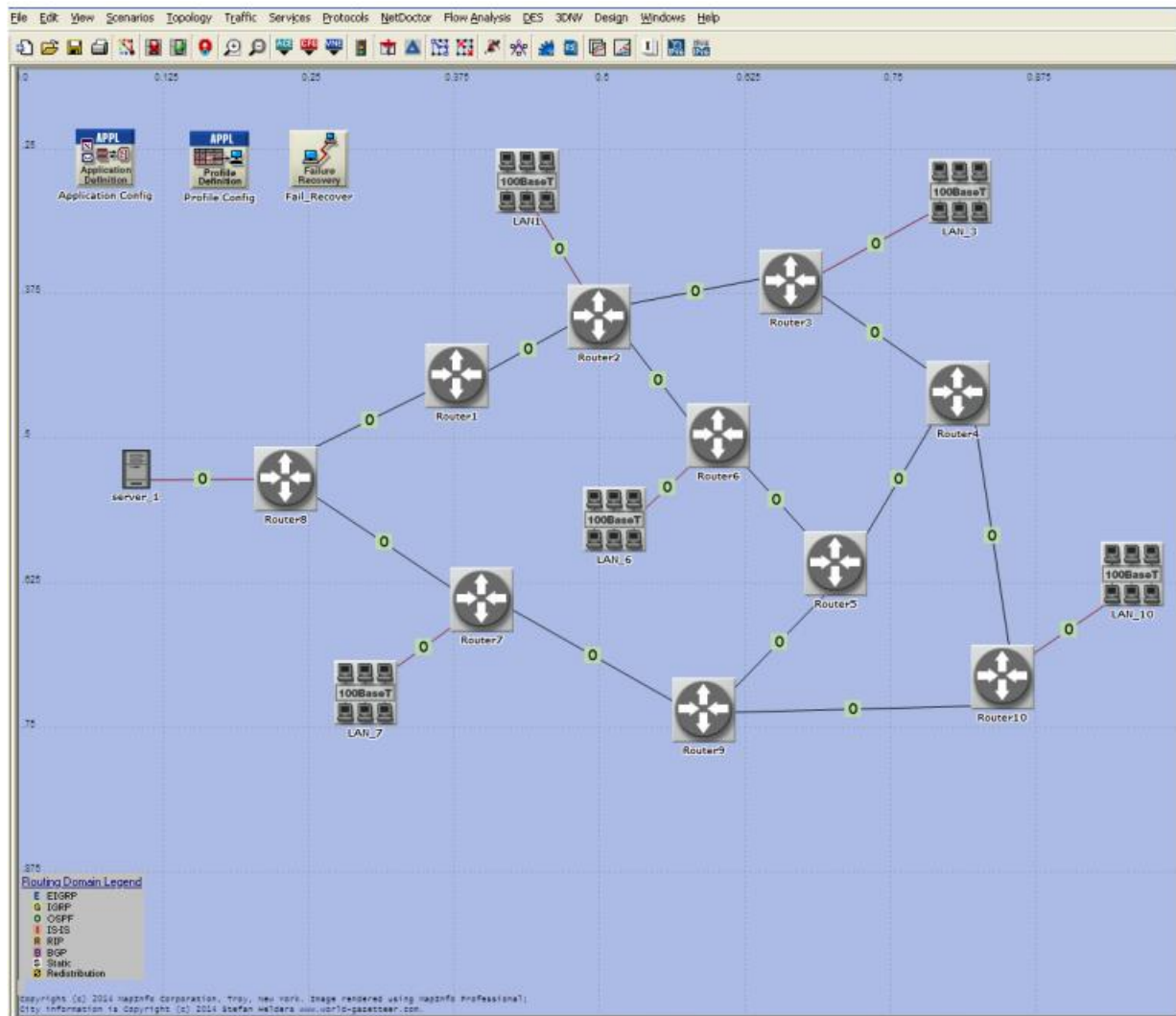


Рисунок 3.1 – Вихідна структура аналізованої мультисервісної мережі зв'язку

Кожна локальна мережа організована з урахуванням технології Fast Ethernet:

- містить 10 комп'ютерів, підключених до комутатора за принципом "Зірка";
- на транспортному рівні підтримується протоколами TCP та UDP;
- генерує трафік відеоконференції (Video Conferencing, VC) з швидкістю 1350 кбіт/с (розмір кадру 128*120 пікселів, частота 10 кадрів/с, роздільна здатність 9 біт на піксель).

Вибір відеоконференції обґрунтований тим, що цей додаток пред'являє підвищені вимоги до QoS (висока швидкість та мінімальний час затримки під час передачі).

Враховуючи, що в якості програми вибрано лише відеоконференцію, організовану на базі клієнт-серверної архітектури, то характеристики сервера Sun Ultra вибрані мінімальними – одноядерний процесор із частотою 333 МГц із підтримкою операційної системи Solaris.

Локальні мережі та сервер підключені до відповідних маршрутизаторів за допомогою кабелів, що підтримують сімейство технологій Ethernet, 100 Мбіт/с.

Маршрутизатори між собою на каналному рівні взаємодіють по протоколу PPP (англ. Point to Point Protocol) і з'єднані мережним кабелем з однаковою заздалегідь визначеною (у кожному імітаційному випробуванні) пропускною здатністю $r=1000$ Мбіт/с, $r=100$ Мбіт/с та $r=10$ Мбіт/с. Таким чином в одному імітаційному випробуванні кожна лінія зв'язку, що з'єднує маршрутизатори, приймає значення тільки $r=1000$ Мбіт/с, в іншому - $r=100$ Мбіт/с та аналогічно в наступному - $r=10$ Мбіт/с.

Покрокове зменшення пропускної спроможності мережного кабелю від 1000 Мбіт/с до 10 Мбіт/с скорочує загальні мережеві ресурси згідно виразу:

$$R_0=12r, \quad (3.1)$$

Цим він імітує процес зовнішнього деструктивного впливу на аналізовану ММЗ.

Маршрутизатори аналізованої мережі у кожному імітаційному випробуванні підтримують лише один метод формування плану розподілу інформації OSPF ($ROUT_{TM}^{(лав)}$ - "Лавинний") або MPLS ($ROUT_{TM}^{(стат)}$ - "Статистичний").

Таким чином, задані:

- методи формування ППІ $ROUT_{TM}$;
- загальному мережевому ресурсі R_0 (сумарні пропускні здібності r мережевого кабелю)

Одне випробування полягає у тридцятихвилинній імітації функціонування аналізованої ММЗ. Причому з нульової до п'ятої хвилини ММЗ функціонує у

штатному режимі (в умовах відсутності зовнішніх деструктивних впливів) (рисунок 3.2).

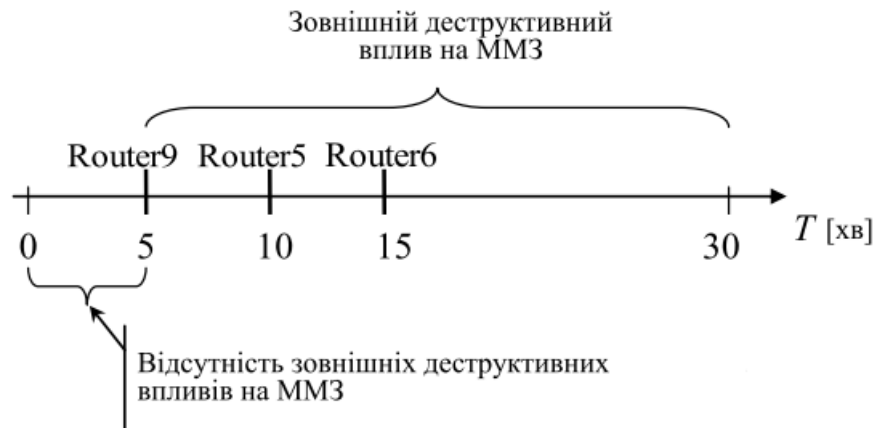


Рисунок 3.2 – Порядок виходу маршрутизаторів з ладу

На п'ятій хвилині маршрутизатор Router9 виводиться з ладу. У такому стані ММЗ продовжує функціонувати до десятої хвилини. На десятій і п'ятнадцятій хвилинах, відповідно, додатково до Router9 виводяться з ладу маршрутизатори Router5 і Router6.

Даний процес (послідовне виведення з ладу маршрутизаторів Router9, Router5 та Router6) додатково до покрокового зменшення загальних мережевих ресурсів (3.1) імітує зовнішній деструктивний вплив на аналізовану ММЗ. В результаті структура аналізованої мережі зв'язку в процесі одного випробування змінюється від «Комірчастої» до «Лінійної» (рисунки 3.3, 3.4, 3.5 та 3.6).

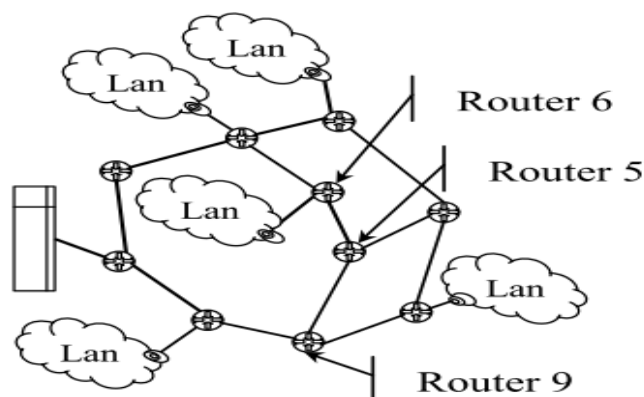


Рисунок 3.3 – Структура аналізованої ММЗ з 0 по 5 хвилину моделювання

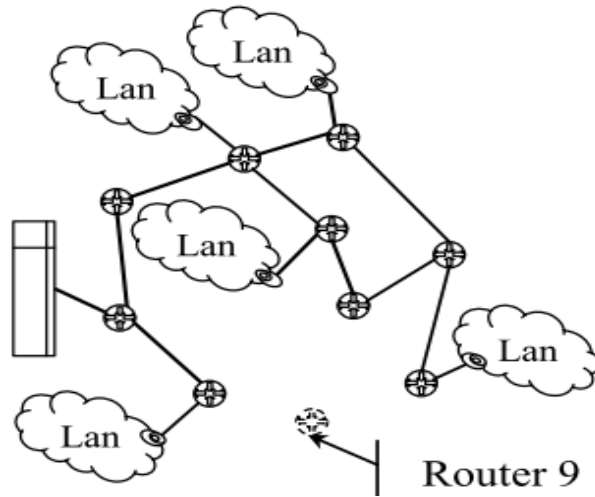


Рисунок 3.4 – Структура аналізованої ММЗ з 5 по 10 хвилину моделювання

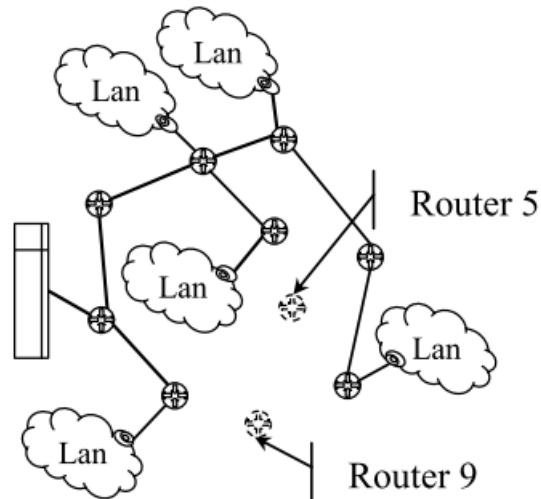


Рисунок 3.5 – Структура аналізованої ММЗ з 10 по 15 хвилину моделювання

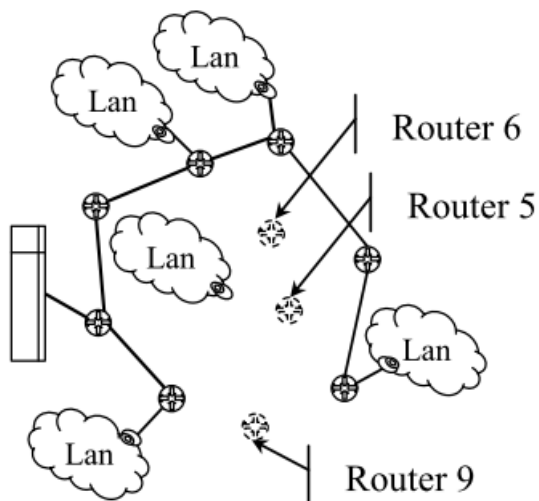


Рисунок 3.6 – Структура аналізованої ММЗ з 15 по 30 хвилину моделювання

Результатом одного випробування імітаційного моделювання є кількість втрачених пакетів $N_{\text{втр}}а$ за одиницю часу.

На рисунках 3.7, 3.8 та 3.9 представлені результати імітаційного моделювання аналізованої мультисервісної мережі зв'язку.

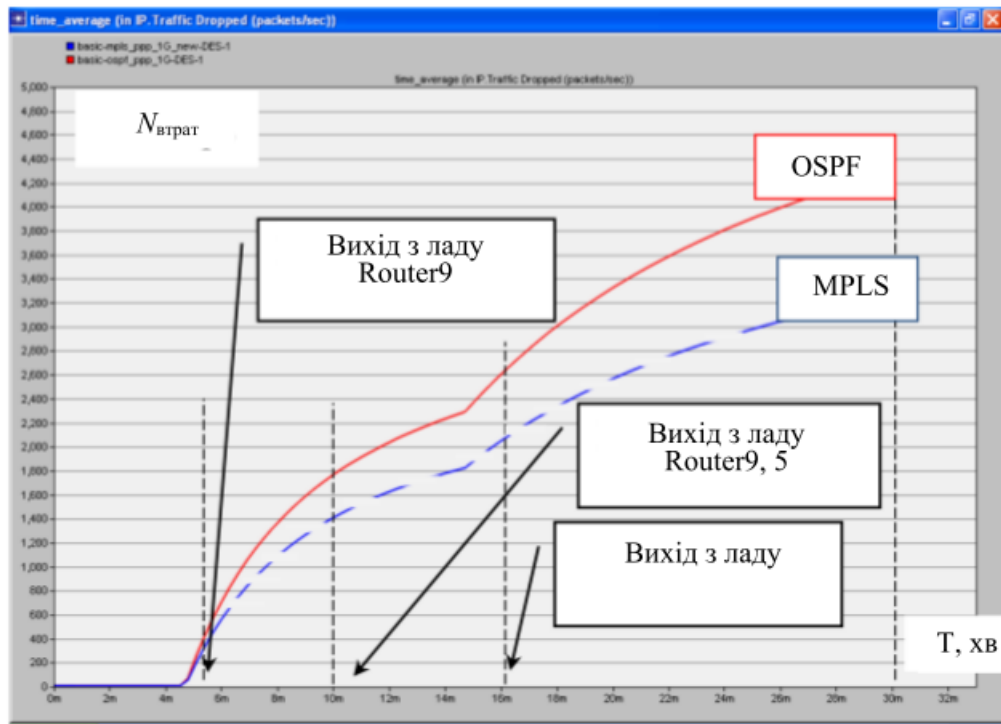


Рисунок 3.7 – Пропускна здатність $r=1000$ Мбіт/с

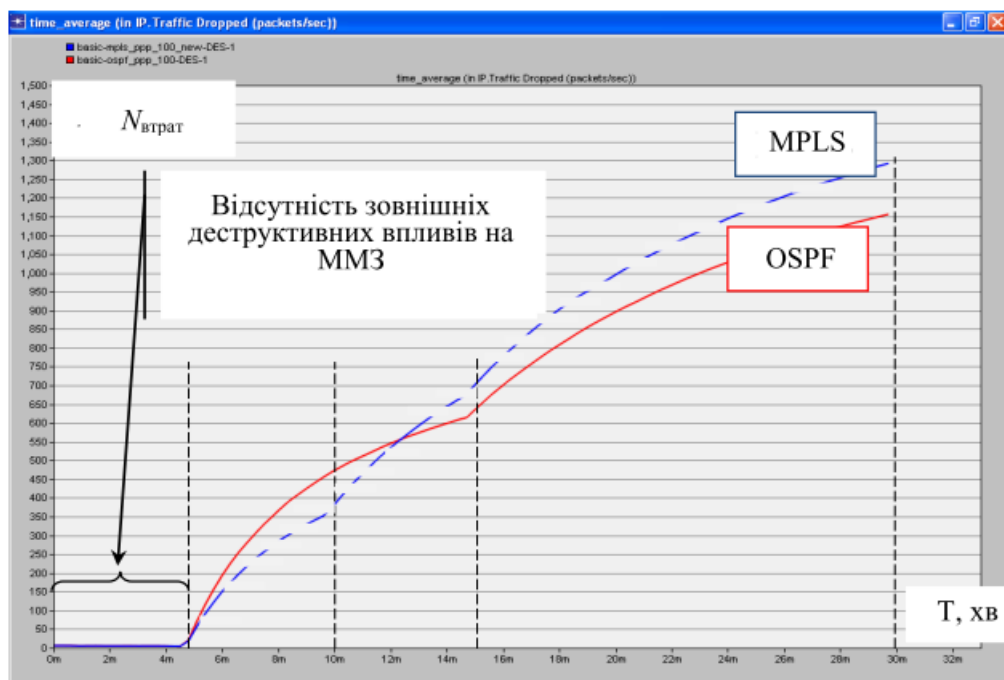


Рисунок 3.8 – Пропускна здатність $r=100$ Мбіт/с

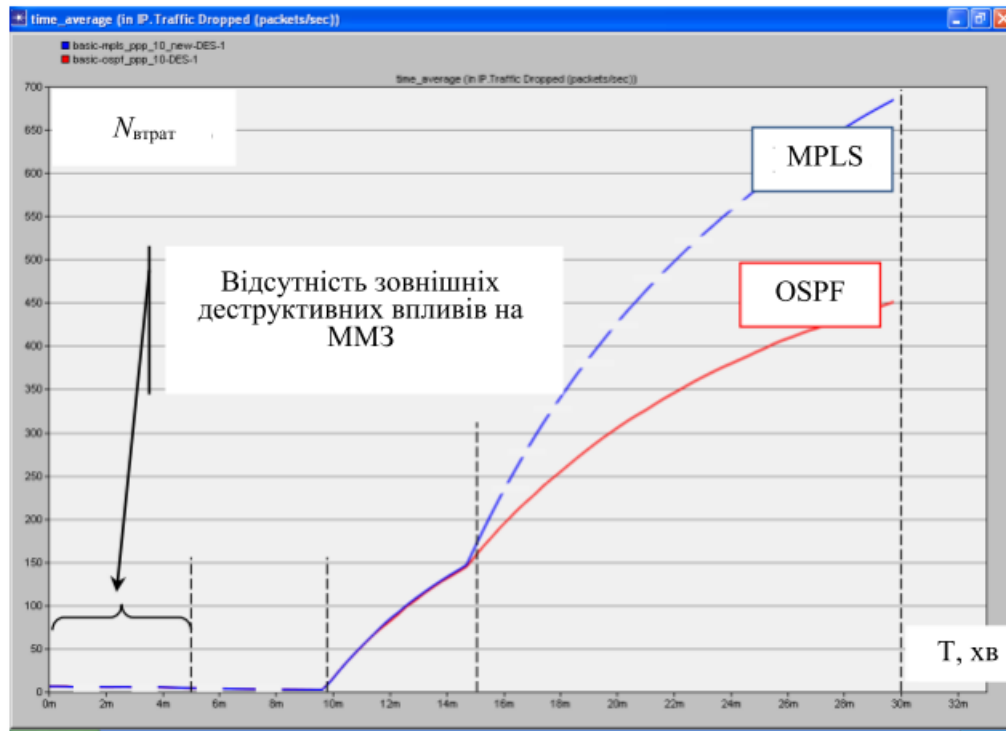


Рисунок 3.9 – Пропускна здатність $r=10$ Мбіт/с

Випишемо основні значення одержаних результатів моделювання. Введемо такі позначення:

- $R_0^{(i)}, i = \overline{1,4}$ - загальний мережевий ресурс аналізованої ММЗ в одному імітаційному випробуванні на відповідному інтервалі часу, який визначається так:

$$\begin{cases} R_0^{(1)} = 12 \cdot r, & \text{інтервал моделювання з 0 до 5 хвилин;} \\ R_0^{(2)} = 9 \cdot r, & \text{інтервал моделювання з 0 до 5 хвилин;} \\ R_0^{(3)} = 7 \cdot r, & \text{інтервал моделювання з 0 до 5 хвилин;} \\ R_0^{(4)} = 6 \cdot r, & \text{інтервал моделювання з 0 до 5 хвилин.} \end{cases}$$

З урахуванням (3.1) потрібно розрахуваємо значення змінної x , що визначає ступінь недоступності загальних мережевих ресурсів аналізованої мережі, за наступним правилом:

$$x_i = \frac{R_0 - R_0^{(i)}}{R_0}; i = \overline{1,4}. \quad (3.2)$$

Отримані результати потрібно внести до таблиці 3.1. Для зручності опустимо індекс i при x_i і проведемо нормування значень таблиці 3.1 за формулою:

$$\bar{N} = 1 - \frac{N_{\text{втрач}}^{(j)}}{N_{\text{втрач}}^{(j)}(\max)}; j = \overline{1,3}, \quad (3.3)$$

де $N_{\text{втрач}}^{(j)}; j = \overline{1,3}$ – максимальне значення $N_{\text{втрач}}$ у кожному із трьох випробувань імітаційного моделювання: $N_{\text{втрач}}^{(1)}(\max) = 4300$; $N_{\text{втрач}}^{(2)}(\max) = 1300$; $N_{\text{втрач}}^{(3)}(\max) = 750$.

Таблиця 3.1 - Результати імітаційного моделювання

№ імітаційного випробування	r , Мбіт/с	x_i	$N_{\text{втрач}}$	
			MPLS	OSPF
1	1000	$x_1=0$	0	0
		$x_2=0,24$	1300	1700
		$x_3=0,43$	1800	2400
		$x_4=0,5$	3300	4300
2	100	$x_1=0$	0	0
		$x_2=0,24$	340	470
		$x_3=0,43$	670	595
		$x_4=0,5$	1300	1100
3	10	$x_1=0$	0	0
		$x_2=0,24$	0	0
		$x_3=0,43$	140	140
		$x_4=0,5$	700	440

Отримані результати розрахунків представлені у таблиці 3.2 та на рисунках 3.10, 3.11 та 3.12.

Таблиця 3.2 - Нормовані результати імітаційного моделювання

r , Мбіт/с	x_i	$N_{сер}$	
		MPLS	OSPF
1000	$x_1=0$	1	1
	$x_2=0,24$	0,66	0,57
	$x_3=0,43$	0,57	0,46
	$x_4=0,5$	0,25	0
100	$x_1=0$	1	1
	$x_2=0,24$	0,72	0,63
	$x_3=0,43$	0,47	0,53
	$x_4=0,5$	0	0,11
10	$x_1=0$	1	1
	$x_2=0,24$	1	1
	$x_3=0,43$	0,78	0,78
	$x_4=0,5$	0	0,35

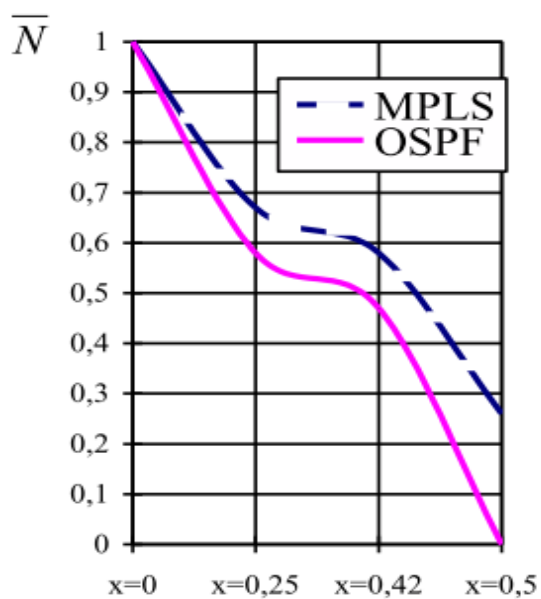


Рисунок 3.10 – Нормовані результати моделювання при $r=1000$ Мбіт/с

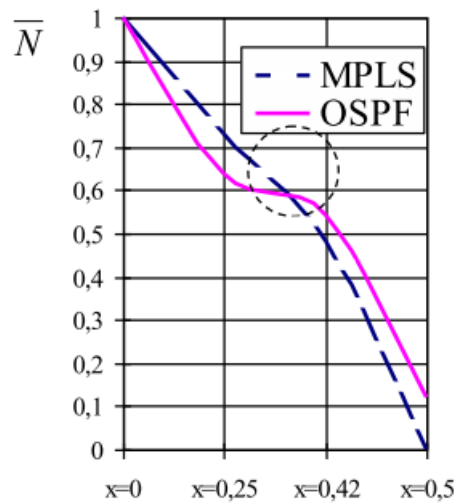


Рисунок 3.11 – Нормовані результати моделювання при $r=100$ Мбіт/с

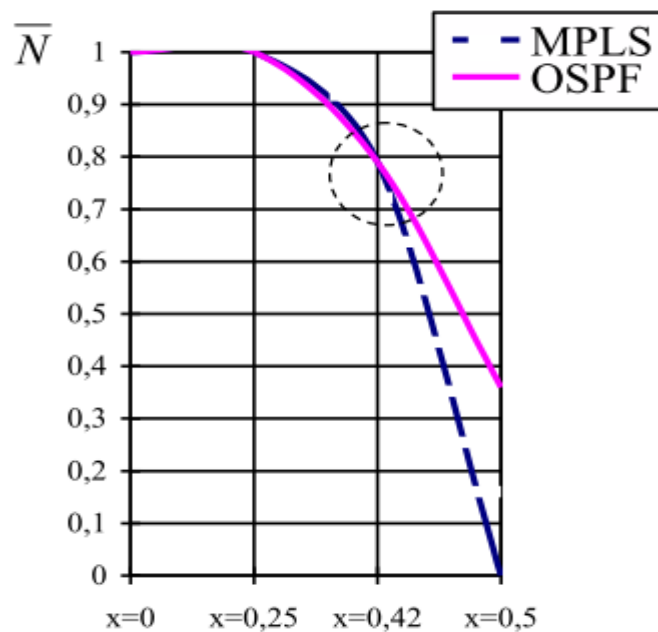


Рисунок 3.12 – Нормовані результати моделювання при $r=10$ Мбіт/с

Отримані результати дозволяють стверджувати, що в умовах зовнішнього деструктивного впливу $\Psi(t)$, при якому приблизно 30% мережевих ресурсів ММЗ виходить з ладу, доцільно застосовувати «Лавинні» методи формування плану розподілу інформації.

3.2 Аналіз результатів математичного моделювання маршрутизації в умовах вхідного самоподібного трафіку та зовнішніх деструктивних впливів на елементи мультисервісної мережі зв'язку

З використанням розробленої методики визначається ймовірність відмови в обслуговуванні в цілому по ММЗ для різних методів маршрутизації за наступних вихідних даних.

1) структура мультисервісної мережі зв'язку (рисунок 3.13) подається у вигляді неорієнтованого графа $G[A_S, M_S]$ з такими множинами:

- вершини $A_S = \{a_i\}; i=1, 2, \dots, S; S=12$, що відповідають ВК;
- ребер $M_S = \{m_{ij}\}; i, j=1, 2, \dots, S; i \neq j$, відповідних трактам передачі повідомлень.

Кожен ТПП характеризується пропускнуою здатністю $\mu = \mu_{ij} = 100 \cdot 10^6; i, j=1, 2, \dots, 12; i \neq j$ пакетів/с. Тривалість обслуговування пакетів повідомлень асинхронного потоку даних, що надходить у ТПП між a_i і a_j ВК підпорядковується експоненційному закону з параметром $w = \frac{1}{\mu}$.

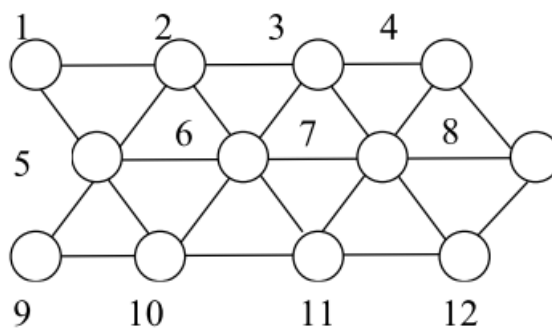


Рисунок 3.13 – Початкова структура ММЗ

2) аналізовані методи маршрутизації (відповідно до класифікації, наведеною на рисунку 1.4):

- $ROUT_{\text{посл}}^{(\text{лав})}$ – «Послідовний детермінований із лавинним методом формування ПРІ»;

- $ROUT_{пар}^{(лав)}$ – «Паралельний детермінований з лавинним методом формування ПРІ»;

- $ROUT_{посл}^{(стат)}$ – «Послідовний детермінований з статистичним методом формування ПРІ»;

- $ROUT_{пар}^{(стат)}$ – «Паралельний детермінований зі статистичним методом формування ПРІ»;

3) пакети ε -го додатку ($\varepsilon = \overline{1, E}$; $E = 3$ надходять у мультисервісну мережу зв'язку з інтенсивністю $\lambda = \lambda_\varepsilon, \varepsilon = \overline{1, E}$, величина якої може приймати одне їх значень: $\lambda_1 = 10 \cdot 10^6$; $\lambda_2 = 50 \cdot 10^6$;

4) $H = H_\varepsilon = 0,5$; $\varepsilon = \overline{1, E}$ – параметр Херста ε -го додатку;

5) імовірність надходження потоку даних ε -го додатку в a_R -ий ВД для його подальшої передачі a_L -му ВО визначається матрицею тяжінь:

$$\Pi_\varepsilon = \|\pi_{\varepsilon, R, L}\|_{S, S}. \quad (3.4)$$

Елементи матриці тяжіння:

$$0 \leq \pi_{\varepsilon, R, L} \leq 1; \sum_{R, N=1}^S \pi_{\varepsilon, R, L} = 1; \varepsilon = \overline{1, E}. \quad (3.5)$$

Вони рівні між собою та мають рівноймовірний характер;

6) зовнішній деструктивний вплив на елементи ММЗ представимо у вигляді матриці:

$$P_{dec} = \|p_{dec\ i}^j\|_{S, S}, \quad (3.6)$$

де $p_{dec\ i}^j$ - імовірність виходу з ладу ребра m_{ij} вихідного графа $G[A_S, M_S]$, який описує структуру мультисервісної мережі зв'язку.

Прийmemo $p_{\text{dec}} = p_{\text{dec } i}^j; i, j = \overline{1, S}$, значення якої змінюватимемо від 0 до 0,6 з кроком $\Delta p_{\text{dec}} = 0,05$.

Графіки залежностей ймовірності відмови в обслуговуванні в цілому по мультисервісній мережі зв'язку (інтегральна оцінка) при $\lambda_1 = 10 \cdot 10^6$ і $\lambda_2 = 50 \cdot 10^6$ відповідно, представлені на рисунках 3.14 та 3.15. Похибка вимірювань у дослідженнях не перевищує один відсоток.

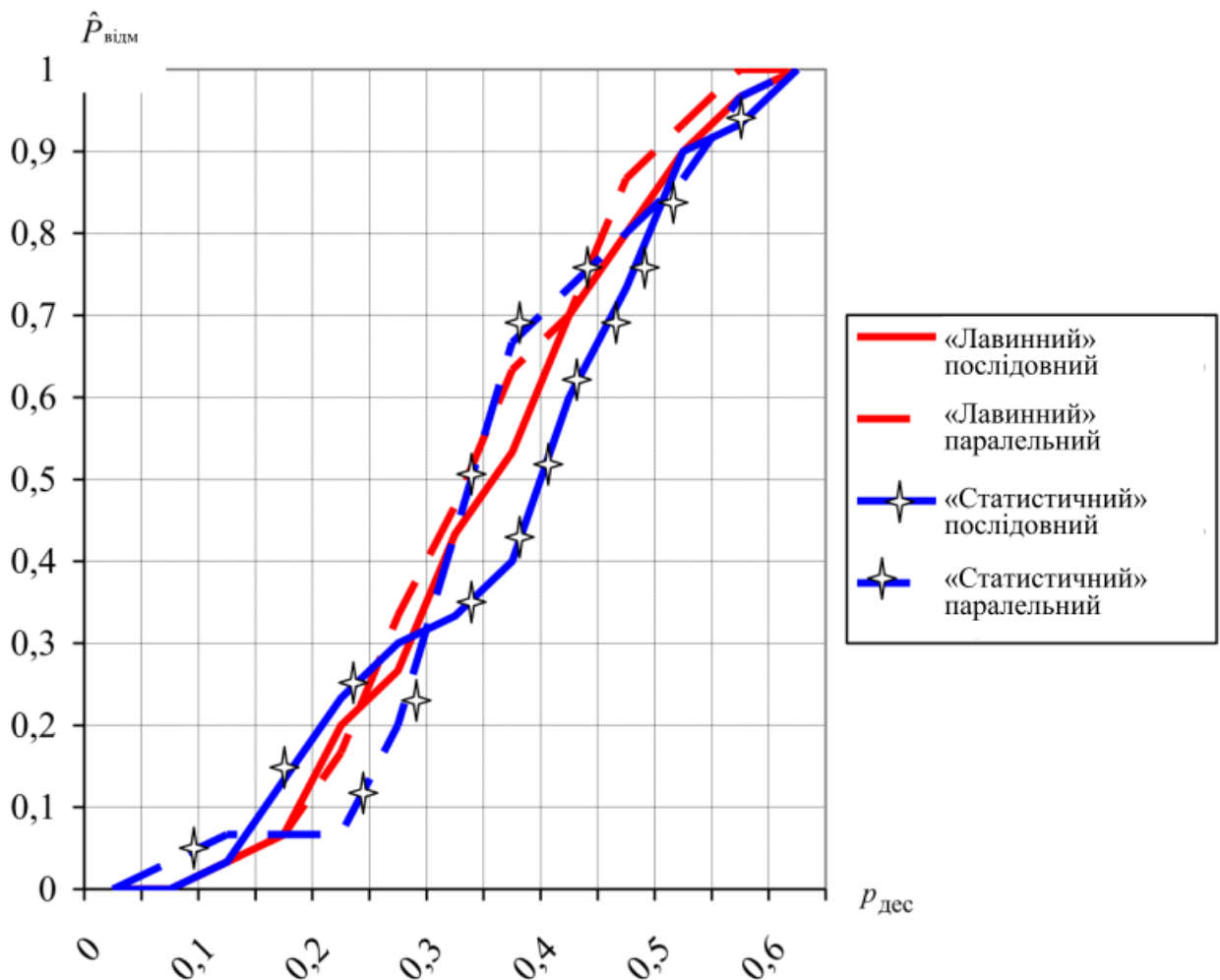


Рисунок 3.14 – Залежності ймовірності відмови в обслуговуванні в цілому по мультисервісній мережі зв'язку (інтегральна оцінка) при $\lambda_1 = 10 \cdot 10^6$

З графіків на рисунку 3.14 видно, що при ($\lambda_1 = 10 \cdot 10^6$) низькій інтенсивності надходження пакетів ε -го додатку ($\varepsilon = \overline{1, E}; E = 3$) в ММЗ характер впливу методів маршрутизації на інтегральну оцінку загалом однаковий.

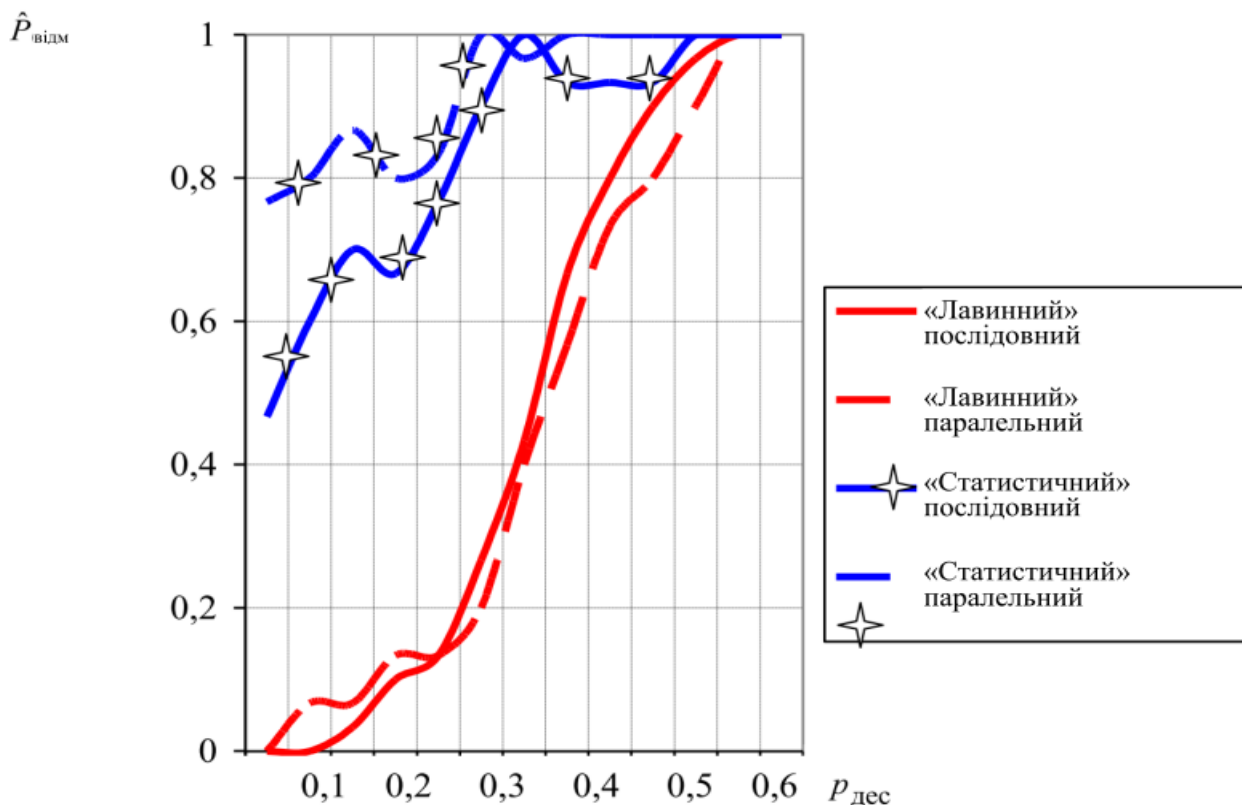


Рисунок 3.15 – Залежності ймовірності відмови в обслуговуванні в цілому по мультисервісній мережі зв'язку (інтегральна оцінка) при $\lambda_2=50 \cdot 10^6$

Зростання інтенсивності надходження пакетів до ММЗ до $\lambda_2=50 \cdot 10^6$ призводить до істотного збільшення ймовірності відмови в обслуговуванні загалом по мультисервісній мережі зв'язку. Причому «Лавинні» методи мають суттєву перевагу в порівнянні зі «Статистичними». Так само підтверджується результат, отриманий на рисунках 2.1, 2.2, 3.10, 3.11 та 3.12) в умовах зовнішнього деструктивного впливу, при якому близько 30% мережевих ресурсів виходить з ладу, доцільно застосовувати «Лавинні» методи формування плану розподілу інформації з паралельним вибором вихідних ТПП.

3.3 Аналіз результатів статистичного моделювання маршрутизації на спрощеній імітаційній моделі мережі зв'язку

Наведемо результати статистичного моделювання процедур маршрутизації на спрощеній імітаційній моделі мережі зв'язку за наступних умов.

При визначенні плану розподілу інформації будемо використовувати методику для однорідної комірчастої мережі зв'язку великої розмірності.

Відповідно до рисунку 2.7, приймемо: $X_{max}=10$ (максимальна кількість ВК по осі X); $Y_{max}=5$ (максимальна кількість ВК по осі Y); $S= X_{max} \cdot Y_{max}=50$ (кількість ВК в аналізованій мережі зв'язку); $k_{i,j} = 8$; $j = \overline{1,50}$; $p_{dec} = p_{dec}^j$; $i, j = \overline{1, S}$, значення якої змінюватимемо від 0 до 0,8 з кроком $\Delta p_{dec}=0,2$; рівномірний вибір ВД та ВО, тобто значення елементів матриці тяжінь $\pi_{i,j} = \frac{1}{S^2}$; $i, j = \overline{1, S}$; $N_0 = 1000$; відносна похибка результатів статистичного моделювання не перевищує 8 відсотків при $\beta=0,955$.

За заданих умов виберемо для аналізу такі методи маршрутизації:

- $ROUT_{ГВДПЛ}$ – «Градієнтний ймовірісно-детермінований послідовний з логічним методом формування плану розподілу інформації»;
- $ROUT_{ДБВДПЛ}$ – «Дифузний без повернення назад імовірісно-детермінований послідовний з логічним методом формування плану розподілу інформації»;
- $ROUT_{ДВДПЛ}$ – «Дифузний ймовірісно-детермінований послідовний з логічним методом формування плану розподілу інформації»;
- $ROUT_{ЛВДЛ}$ – «Локально-лавинний з детермінованим вибором зони пошуку маршруту та логічним методом формування плану розподілу інформації».

На рисунку 3.16 представлені результати статистичного моделювання методів маршрутизації.

Аналіз результатів моделювання методів маршрутизації показав, що за відсутності або деякої незначної зовнішньої деструктивної дії (при умовах, за яких до 20% мережевих ресурсів виходить з ладу) доцільно застосовувати «статистичні» методи маршрутизації. У випадку виходу з ладу понад 20% мережевих ресурсів необхідно використовувати «Лавинні» методи маршрутизації.

Отже, проведені дослідження методів маршрутизації (з використанням різних математичних та імітаційних моделей) в умовах зовнішніх деструктивних

впливів на елементи мультисервісної мережі зв'язку дозволяють встановити, що застосування того чи іншого методу маршрутизації є актуальним для конкретних масштабів зовнішнього деструктивного впливу. В умовах відсутності зовнішнього деструктивного впливу «Статистичні послідовні» методи маршрутизації забезпечують більший користувальницький мережевий ресурс порівняно з «Лавинними» методами, і тому збільшують можливість передачі більшого обсягу користувальницької інформації.

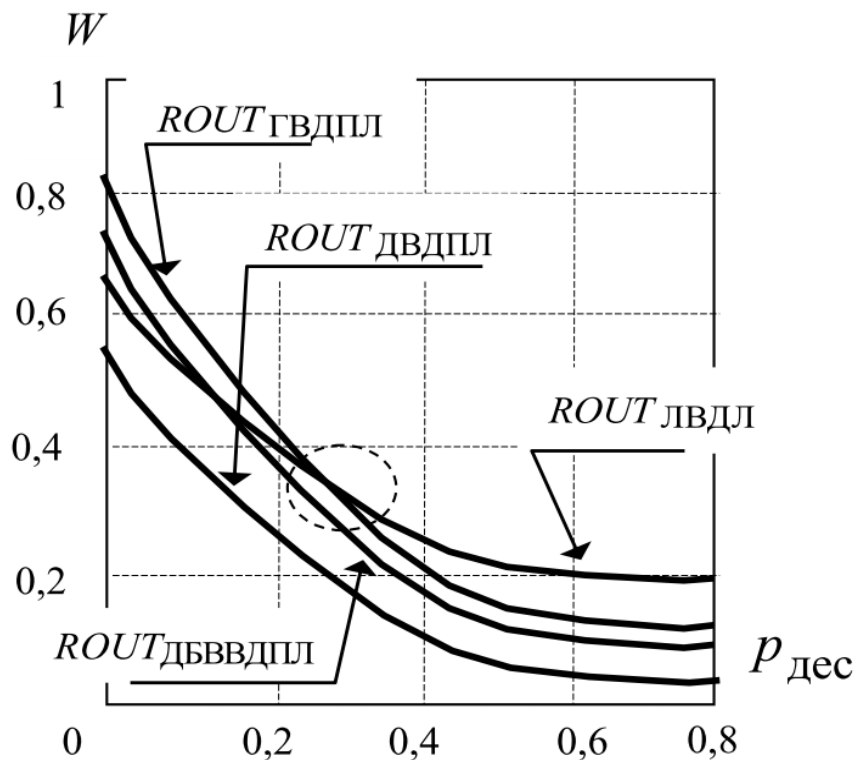


Рисунок 3.16 – Залежність $W=f(p_{\text{дес}})$ для різних методів маршрутизації

Аналіз функціонування мультисервісної мережі зв'язку в умовах зовнішніх деструктивних впливів показав (усереднені дані), що у випадку виходу з ладу понад 30% елементів мультисервісної мережі зв'язку паралельні методи маршрутизації дозволяють знизити до 20% середню ймовірність відмови заявок користувачів обслуговування. Цей результат незалежно підтверджений на різних структурах мультисервісних мереж зв'язку та застосуванням різних математичних та імітаційних моделей.

У разі неможливості зміни "Статистичних послідовних" методів маршрутизації на «Лавинні паралельні» в умовах зовнішніх деструктивних впливів необхідно на етапі проектування мультисервісних мереж зв'язку передбачати не менше 30% резерву їх мережевих ресурсів.

Якщо на етапі проектування мультисервісних мереж зв'язку є можливість передбачати щонайменше 30 % резерву мережевих ресурсів, то тоді це дозволить:

- в умовах зовнішніх деструктивних впливів на елементи мультисервісної мережі зв'язку збільшити можливість передачі більшого обсягу користувальницької інформації;

- реалізувати захист інформації користувача (конфіденційність, доступність та цілісність) за рахунок паралельних (багатоколійних) методів маршрутизації шляхом використання територіально- розподілених ресурсів у мультисервісних мережах зв'язку (каналів зв'язку, криптографічних програмно-апаратних комплексів, баз даних тощо).

ВИСНОВКИ

1. Здійснено аналіз сучасних методів маршрутизації в мультисервісних мережах зв'язку, що дозволило обґрунтувати класифікацію протоколів маршрутизації та показати недоліки вказаних класів в умовах зовнішніх деструктивних впливів.

2. Розроблено математичну модель маршрутизації за умов вхідного самоподібного трафіку та зовнішніх деструктивних впливів на елементи мультисервісної мережі зв'язку, що дозволило розробити методи перевірки графа мережі на зв'язність та методику визначення плану розподілу інформації.

3. Проаналізовано результати математичного моделювання маршрутизації в умовах вхідного самоподібного трафіку та зовнішніх деструктивних впливів на елементи мультисервісної мережі зв'язку, що дозволило встановити переваги запропонованої моделі.

4. Здійснено імітаційне моделювання мультисервісної мережі зв'язку в умовах обмежених мережевих ресурсів та зовнішніх деструктивних впливів, що дозволило проаналізувати результати статистичного моделювання маршрутизації на спрощеній імітаційній моделі мережі зв'язку.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Medhi D., Ramasamy K. Network routing: algorithms, protocols, and architectures. San Francisco: Kaufmann Publishers is an imprint of Elsevier, 2007. - 824 p.
2. Lang D. On the Evaluation and Classification of Routing Protocols for Mobile Ad Hoc Networks. München, Techn. Univ., Diss. Dokt, 2006. - 345 p.
3. Cisco AVVID Network Infrastructure Overview [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: https://www.cisco.com/web/offer/CAT4500/toolkit/comin_ov.pdf
4. Willinger W., Willinger W., Taqqu M.S., and Erramilli A. A bibliographical guide to self-similar traffic and performance modeling for modern high-speed networks. Stochastic Networks: Theory and Applications. In Royal Statistical Society Lecture Notes Series, Oxford University Press, 1996. Vol.4, P.339–366.
5. Tanenbaum A.S., Wetherall D.J. Computer Networks, 5th Ed. Prentice Hall, Cloth, 2011. 960 pp.
6. Stallings W. Foundations of Modern Networking: SDN, NFV, QoE, IoT, and Cloud. - Pearson Education, Inc., Old Tappan, New Jersey, 2016. 538 pp.;
7. Kurose J.F. Computer Networking: A Top-Down Approach, 7th Ed. Pearson Education, Inc., 2017. 864 pp.
8. Fuller R., Roberts J.W. Engineering for Quality of Service. [Електронний ресурс], 2008. Режим доступу: http://reference.kfupm.edu.sa/content/e/n/engineering_for_quality_of_service__454802.pdf
9. Durand B., Sommerville J., Buchmann M. Administering Cisco QoS in IP networking. NY.: Syngress, 2003. 535 p.
10. Заїка В.Ф., Варфоломеева О.Г., Домрачева К.О., Гринкевич Г.О. Телекомунікаційні системи та мережі наступного покоління, 2019. 315с.

11. Яцишин О.В. Дослідження технологій безпроводових сенсорних мереж з інфокомунікаційними наземними вузлами у зоні надзвичайної ситуації. https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/28112/1/Yatsishin_bakalavr.pdf
12. Kizza J. M. Guide to Computer Network Security. Chattanooga: Springer, 2015. 550 p.
13. Building the Carrier-Class IP Next-Generation Network. [Електронний ресурс], 2003. – Режим доступу: http://www.cisco.com/en/US/prod/collateral/routers/ps5763/prod_white_paper0900aecd802e2a52_ns573_Networking_Solutions_White_Paper.html
14. Уніченко П., Осадчук О., Черняк В. Критерії функціонування та надійність мультисервісної мережі зв'язку в умовах зовнішніх деструктивних впливів. Збірник матеріалів науково-практичного симпозиуму «Технології Інтернету речей: системи та рішення» (ТІР СТ - 2024), Тернопіль, 2024. С.77-78.
15. Уніченко П., Драбик І. Математична модель розподілу інформації в умовах зовнішніх деструктивних впливів. Матеріали науково-практичного симпозиуму «Захист інформації». Тернопіль, 2024. С.85-88.
16. ITU-R Recommendation E.800 Terms and definitions, related to Quality of Services and network performance including dependability
17. QoS [Електронний ресурс]. Режим доступу до ресурсу: <https://uk.wikipedia.org/wiki/QoS>.
18. Бараш Л. Архітектура мультисервісних мереж. Комп'ютерне дослідження. Київ. 2002. № 14. С.93-99.
19. Побудова мультисервісної мережі [Електронний ресурс]. Режим доступу до ресурсу: <http://ea.donntu.edu.ua/bitstream/123456789/2845/1/%D0%9F%D0%BE%D0%B1%D1%83%D0%B4%D0%BE%D0%B2%D0%B0%20%D0%BC%D1%83%D0%BB%D1%8C%D1%82%D0%B8%D1%81%D0%B5%D1%80%D0%B2%D1%96%D1%81%D0%BD%D0%BE%D1%97%20%D0%BC%D0%B5%D1%80%D0%B5%D0%B6%D1%96.pdf> .

20. Бовда Е.М., Сальник В.В. Методи забезпечення якості обслуговування в сучасних телекомунікаційних мережах військового призначення. Збірник наукових праць Харківського національного університету Повітряних Сил. 2017. № 2(51). С. 85-94.
21. Піневич Т.О. Стандартизація інфокомунікаційних мереж та систем. Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті 2018 №6. С. 41-58.
22. Бельков Д. В. Дослідження мережевого трафіка. Інформатика, кібернетика та обчислювальна техніка ДонНТУ, Донецьк, 2009. № 10. С. 38-49.
23. ITU-T Recommendation P.862: "Perceptual evaluation of Speech Quality (PESQ), an objective method for End to end speech quality assessment of narrowband telephone networks and speech codecs".
24. Рекомендації ETSI [Електронний ресурс]. Режим доступу до ресурсу: <https://www.etsi.org/>.
25. Рекомендації ITU – T [Електронний ресурс]. Режим доступу до ресурсу: <https://www.itu.int/ITU-T/recommendations/index.aspx?ser=H>.
26. Сигиденко М.М., Казьмірчук Н.В., Войтенко О.О. Аналіз захищеності інформації в мультисервісних мережах. Збірник матеріалів науково - практичної конференції молодих вчених, аспірантів та студентів «Кібербезпека та комп'ютерно-інтегровані технології» (КБКІТ-2023), Тернопіль, 2023. С.77-79.
27. Сигиденко М.М., Басистий В.П. Метод захищеної маршрутизації в мультисервісних мережах. Матеріали науково-практичного симпозіуму «Захист інформації». Тернопіль, 2023. С.171-173.
28. Дузь-Крятченко О. П., Грицай П. М., Грищенко В. П., Клименко В. С. та ін. Основи стратегії національної безпеки та оборони держави: підруч. К. : НУОУ ім. Івана Черняховського, 2015. – 620 с.
29. Бурячок В.Л., Гулак Г.М., Толубко В.Б. Інформаційний та кіберпростори: проблеми безпеки, методи та засоби боротьби: Підручник. К.: ДУТ, 2015. 449 с.
30. Власюк О.С. Національна безпека України: еволюція проблем внутрішньої політики: Вибр. наук. праці. К. : НІСД, 2016. 528 с.